

1 INTRODUCCIÓN	9
2 OBJETO DEL ESTUDIO	11
3 MEMORIA DESCRIPTIVA.....	12
3.1 Antecedentes:.....	12
3.2 Descripción del Martinete.....	18
3.3 Descripción de la cubierta.....	21
4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ESTUDIO	23
5 IDENTIFICACIÓN DE PATOLOGÍAS.....	31
5.1 Patologías de origen biótico	32
5.1.1 Hongos xilófagos	32
5.1.2 Mohos y hongos cromógenos	33
5.1.3 Hongos de pudrición	34
5.1.4 Pudrición parda.....	35
5.1.5 Pudrición blanca	35
5.1.6 Pudrición blanda	36
5.1.7 Insectos de ciclo larvario	37
5.1.8 Anóbidos.....	38

5.1.9 Cerambícidos	41
5.1.10 Curculiónidos	43
5.2 Patologías de origen abiótico	45
5.3 Patologías de origen estructural	47
6 ESTADO ACTUAL. RESULTADO DE LA INSPECCIÓN	48
7 TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS	55
7.1 Resistógrafo	57
7.2 Métodos acústicos	59
7.3 Pilodyn	62
7.4 Método de arranque de tornillo	63
7.5 Xilohigrómetro	64
8 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA MADERA ESTRUCTURAL	65
8.1 Determinación de la especie	65
8.2 Técnicas no destructivas. Asignación de la clase resistente	67
8.2.1 Pilodyn	69
8.2.2 Método Arranque de Tornillo	71
8.2.3 Método de ultrasonidos	73

8.3 Conclusiones de TND	75
9 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE MADERA.....	78
9.1 Bases de cálculo	78
9.2 Acciones consideradas en el cálculo.....	79
9.3 Duración de las cargas.....	82
9.4 Clases de servicio	83
9.5 Modelo de cálculo	84
10 RESULTADOS DE CÁLCULO.....	88
10.1 Resultados estado inicial C14	88
10.2 Resultados estado inicial C22	92
10.3 Justificación del estado actual observado	96
11 CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN.....	100
12 PROPUESTA DE NUEVA CUBIERTA	104
12.1 Resultado C22 rehabilitado	107
Anexo A. Dimensiones y observaciones iniciales	112
Anexo B. Evaluación e identificación de daños.....	116
Anexo C. Información END.....	124

Anexo D. Planos.....	130
Anexo E. Fotografías.....	134
Anexo F. Propiedades de clase resistente de la madera aserrada	154
Anexo G. Ensayos realizados en el eje del Martinete	156
BIBLIOGRAFÍA	164

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento es un estudio sobre el estado de conservación del Martinete de Navafría.

En un principio hubo que ponerse en contacto con los propietarios del Martinete de Navafría, hijos de Victoriano, el calderero de Navafría, y plantearles el interés en realizar un estudio sobre el estado de conservación del Martinete. En un principio se pretendía realizar un estudio acerca del mecanismo, pero en una primera visita al edificio se observa que el estado de la cubierta presenta un deterioro bastante elevado, al haber una rotura en una de las vigas principales, por lo que se decidió centrar el estudio sobre la cubierta.

En la decisión de centrar el estudio en la cubierta también influyó el hecho de que recabando información acerca del Martinete de Navafría se hallaron bastantes documentos que se centraban en el estudio del Martinete en sí, detallando con un alto grado de fidelidad las dimensiones y características de todo el ingenio. Sin embargo, no se encontró ningún documento que hiciera referencia a la cubierta, si bien sí aparecieron diversos planos del edificio, en ninguno había una descripción de la cubierta. Por esta casuística se decidió centrar el estudio en el estado de conservación de la cubierta, de este modo, a la vez que se estudia el estado actual de la estructura y se plantean posibles medidas a adoptar, se recoge información y se documenta la estructura y el diseño que la conforma de manera que esta información sirva, si fuera necesario para una reconstrucción lo más fiel posible, siempre y cuando cumpla con la normativa aplicable. El presente documento detalla la estructura de la cubierta y el estado de conservación en el que se encuentra. Se realizan varias comprobaciones de cálculo con el fin de determinar los índices de agotamiento de la estructura y se proponen una serie de medidas correctoras.

En la elaboración de este documento primeramente se procedió a recopilar la información disponible sobre el Martinete de Navafría, recorriendo la biblioteca pública de Segovia, el museo provincial, contactando con diferentes personas relacionadas con el Martinete, etc.

Una vez recabada toda la documentación y comprobado que no había información referente a la cubierta ni a su estructura se procedió a realizar un croquis de la misma.

En el levantamiento de los croquis de la estructura de la cubierta se recurrió a un medidor laser, cinta métrica y un flexómetro. De este modo se realizó un croquis que posteriormente se digitalizó en Auto-Cad® y en Cadwork® obteniendo así unos planos detallados de la estructura.

Una vez realizados los planos se llevó a cabo una inspección en detalle para comprobar el grado de ataque que sufría la estructura y determinar las patologías que tenía. Para este análisis se emplearon diferentes técnicas no destructivas como Pilodyn®, arranque de tornillo y ultrasonidos. Mediante estas técnicas se pudo evaluar el grado de ataque que presentaba la estructura.

Las técnicas no destructivas también se emplearon para determinar las propiedades de la madera que permiten hacer una estimación de la clase resistente y poder así aplicar el Código Técnico de la Edificación. Esta comprobación se realizó para poder establecer unos índices de agotamiento de la estructura y poder determinar el estado y el grado de seguridad que ofrece en el estado actual.

Una vez obtenidos unos valores de clase resistente se procedió a modelizar la estructura en Estrumad para realizar los cálculos y comprobar las propiedades de la misma. Una vez modelizada la estructura se analizaron los resultados y se procedió a redactar unas conclusiones.

2 OBJETO DEL ESTUDIO

Este documento es un estudio de la cubierta de madera del Martinete de Navafría.

Se realizará:

- Una inspección y análisis sobre la estructura de la cubierta del Martinete.
- Una identificación y cuantificación de las diferentes patologías.
- Se aplicarán Técnicas No Destructivas con el fin de cuantificar los daños y por otra parte con el objetivo de estimar las propiedades mecánicas de la madera.
- Se realizará un análisis estructural con el fin de determinar los índices de agotamiento de las secciones de las piezas de la estructura de la cubierta según la normativa vigente y así servir de ayuda técnica en el proceso de toma de decisiones sobre las actuaciones a abordar.

No se tratará:

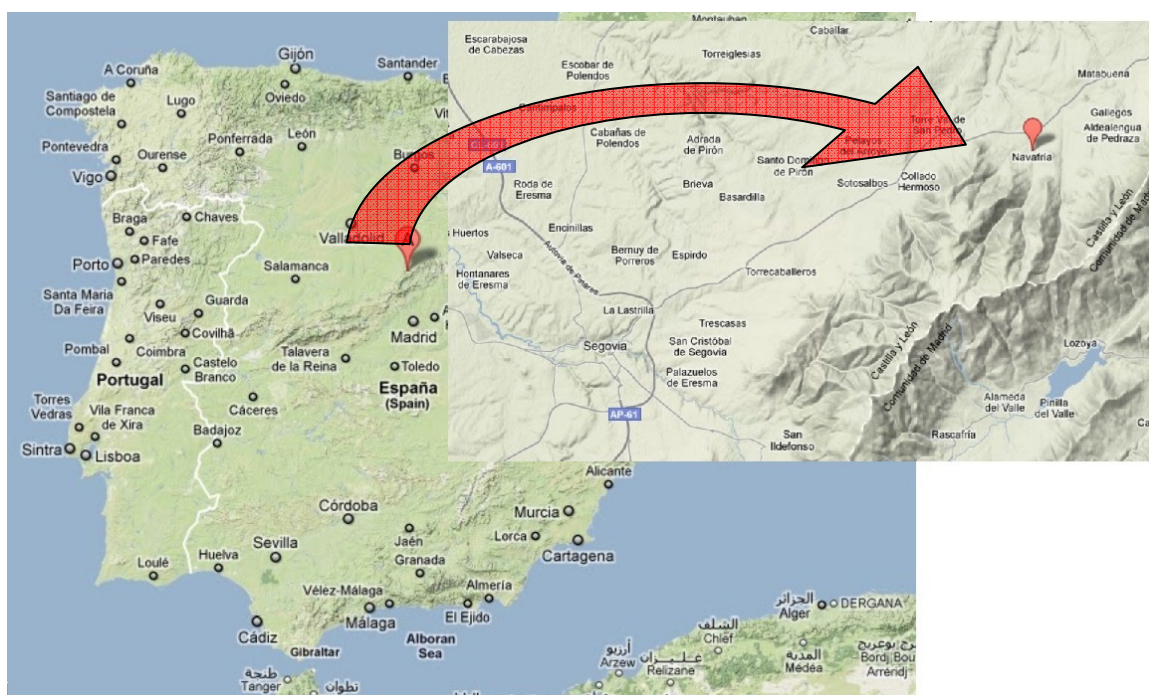
- El estado de conservación del entramado situado en el lado Oeste.
- Ni el estudio de la cimentación ni el estado de los muros de mampostería.
- No se abordará un estudio sobre el ingenio hidráulico ni sobre ningún elemento que no esté suficientemente descrito.

3 MEMORIA DESCRIPTIVA

3.1 Antecedentes:

El Martinete se encuentra enclavado en el término municipal de Navafría. Navafría es un municipio de la vera de la sierra de Guadarrama perteneciente a la Comunidad de Villa y Tierra de Pedraza, situado al sur-este de la provincia de Segovia, a 30 km de la capital.

Navafría es un pueblo serrano característico, con viejas casas de piedra berroqueña, rodeado de robledales y fresnedas y con extensos sotos y praderíos que sirven de pasto a ganado equino y vacuno de la zona.



Detalle de situación de Navafría

Navafría es también conocido por el puerto homónimo que separa la vertiente segoviana de la madrileña, por el salto de agua conocido como “El Chorro de Navafría” y por el extenso bosque de pino silvestre del cual derivan buena parte de los ingresos del pueblo por los trabajos que en él se desarrollan.

El término municipal es cruzado por diversos arroyos y por el río Cega, que lo atraviesa de Sur a Norte. Este río nace en lo alto del Nevero, una de las cumbres de la cordillera carpetovetónica, y es en él donde se ubica el Martinete.



Ubicación del término municipal de Navafría en la provincia de Segovia.

El Martinete es un ingenio hidráulico, de los muchos que se desarrollaron desde que en el siglo XI apareciera el batán. Estos ingenios se desarrollaron para servirse de la energía hidráulica y realizar diversos trabajos que de otra forma serían muy duros y se emplearía mucho más tiempo. Así la ciudad de Segovia, por ejemplo, contaba en el siglo XVIII, según el Catastro del Marqués de la Ensenada, con 11 molinos harineros, 1 molino de papel, 1 molino de aceite de linueso, 5 batanes para paños y tres tahonas de aceite de linueso. Los ingenios eran movidos por las aguas de los ríos Eresma y del arroyo Cigüñuela. Dos siglos antes, concretamente en 1592, Enrique Cook realiza un viaje por España y, al llegar a Segovia la describe así: “Su sitio es un otero alto, descubierto a la parte del mediodía, y de levante pasa un riachuelo llamado Eresma, que nasce más arriba de los bosque de su majestad, de las sierras que allí hay, en cuya ribera abaxo está una buena alameda, y en ella hay algunos monasterios, y hace mover batanes, molinos de pan y papel y más el ingenio de la nueva moneda” (Sanz, I., 2000).

Todos estos ingenios se ponían en funcionamiento a partir de una rueda grande movida por una corriente de agua; estas ruedas podían ser horizontales o verticales, en cuyo caso el eje se adentra en el edificio poniendo en marcha, a través de distintos mecanismos y engranajes, el artilugio en cuestión.

Para la elección del enclave donde ubicar un martinete se deben dar una serie de circunstancias para poder construir un ingenio con un coste razonable. Hemos de pensar en la época de construcción, entre finales del XIX y principios del XX, cuando no había grandes retroexcavadoras, ni maquinaria que permitiera modificar el medio con la facilidad que se podría realizar en la actualidad. Para su ubicación son necesarias estas dos circunstancias:

- Debía haber agua corriente durante todo el año, para poder mover el ingenio y tener la posibilidad de trabajar todo el año, esto lo proporcionaba el río Cega.
- Además debía aflorar la roca madre para que los golpes del martinete fueran efectivos y no se deshiciera el suelo sobre el que golpea el martillo pilón.

La aparición del martinete supuso un gran avance en la evolución del trabajo de los metales, inicialmente del hierro y luego de otros como el cobre. Hay cierta confusión sobre cuando aparece este ingenio. Al parecer, el antecedente del martinete y de otros ingenios hidráulicos se encuentra en el batán. A este respecto ha dejado escrito Caro Baroja: “llamaré ahora la atención al lector sobre el martinete, para hacerle ver cómo obedece a un principio mecánico muy parecido al batán. El martinete es también un martillo o mazo movido por una rueda hidráulica.” Y el propio Caro recalca: “De la esfera de la industria agrícola y de la industria textil parece haber salido el mazo hidráulico para ser aplicado a la siderurgia y a la explotación de los metales en general. En ella la asociación de ruedas, martillos, fuelles, arcas de aire, etc., adquiere una complejidad extraordinaria de la que –en parte- nos dan cuenta algunos libros de tecnología del siglo XVI y también ciertas pinturas, paisajes de la misma época.”

A finales del siglo XII aparecen documentos eclesiásticos y políticos en los que se alude a artilugios como molinos y ferrerías, ya que tanto las órdenes conventuales como los reyes suelen ceder su explotación, bajo determinadas condiciones económicas, a distintos particulares. Son precisamente estos contratos los que han llegado hasta nosotros. Ahora

bien, hay que pensar que el grado de desarrollo inicial sería escaso si se atiende a la documentación aportada por Ignacio González Tascón: “El paso de las ferrerías masuqueras –en los que la fuerza que acciona el mazo de forja y los fuelles que soplan el horno es tan sólo la de los hombres- a la que utiliza fuerza motriz hidráulica parece generalizarse en la península a lo largo del siglo XIV. En el Fuero de las Ferrerías, concedido en 1335 por Alfonso XI de Castilla a la guipuzcoana villa de Segura, se establece ya esta distinción entre “ferrerías masuqueras e otras de mazo de agua”. Todo parece indicar –sigue afirmando González Tascón- que es entonces cuando los ferrones vascos abandonan los montes donde no hay corrientes de agua y bajan a asentarse en las riberas del río Urola –agua de ferrerías- aprovechando su energía para instalar forjas hidráulicas.” (Sanz, I., 2000).

Es también muy interesante hablar del sistema hidráulico que emplea para insuflar el aire a la fragua. En el siglo XVI se empleaba un sistema conocido como barquineras o máquinas soplantes. Eran ingenios que mediante una rueda, más pequeña que la que movía los mazos, accionaba dos barquines o fuelles obteniendo de este modo una corriente de aire necesaria para la fragua. Todas estas técnicas se fueron perfeccionando y se sabe que fue también en el siglo XVI cuando se difunde selectivamente en muchas regiones de España la “trompa de soplar”, tributaria del efecto venturi.

Los libros con grabados de la época muestran, con las variantes propias del tiempo y lugar, unos ingenios hidráulicos análogos a los que se encuentran en el Martinete de Navafría, objeto del presente estudio, por lo que, con palabras de Ignacio Sanz, “podemos afirmar que el Martinete de Navafría es hijo directo de los martinetes del siglo XVI y acaso nieto espurio, si se nos permite la expresión, de los martinetes que intuimos más toscos o menos desarrollados, de los siglos XII, XIII y XIV en los que aparecen testimonios sobrados de su existencia”.

Este martinete es propiedad de la familia Abán, a continuación se relata la saga familiar que ha hecho posible la llegada hasta nuestros días de dicho ingenio.

En el año 1861 llega el primer Abán a Navafría, hasta entonces el apellido era desconocido en la zona. Procede del tronco masculino formado por don Eugenio Abán Raso, natural de la villa soriana de Vozmediano, situada al pie del Moncayo y rayana con Aragón; el tronco femenino lo encarna doña Venancia Beamonte Simonet, natural de

Peralta (Navarra). Llegan a Navafría arrastrando consigo un nutrido puñado de hijos, además de Manuel Abán, hermano de Eugenio. Entre los dos, y a partes iguales, adquieren el mismo año de su llegada la mitad de una sierra de agua para convertirla en martinete, y la otra mitad diez años más tarde. Es de suponer que los dos hermanos, duchos en el arte de la fundición de cobre, adaptarían los mecanismos de la vieja sierra hidráulica a sus necesidades.

Don Eugenio muere en Navafría el 26 de julio de 1888. Unos meses más tarde fallece también su hijo Victoriano. La continuidad del Martinete se asegura siempre a través de los varones. En el testamento de doña Venancia, que murió en 1910, se recoge un Séptimo Supuesto, “Sobre la preferencia de adjudicación del Martinete a sus tres hijos varones”. “En dicho testamento expone la testadora que es su voluntad que se adjudique a sus tres hijos varones la parte que los corresponde en la fábrica llamada el Martinete, recompensando el valor de ella a sus herederos en otros bienes y si estos se opusieran, mejora a sus tres dichos hijos varones que van citados y se llaman Aniceto, Pedro y Antonio Abán Beamonte, en el tercio de todos los bienes caudal afectos.”

La abundancia de mano de obra familiar obligó a Aniceto a emigrar a Monbeltrán (Ávila), donde existía otro martinete. Pero pasado un tiempo regresa a Navafría. Y él mismo acomete la construcción del nuevo martinete, llamado “Martinete de Abajo”, para distinguirlo del viejo denominado desde entonces “Martinete de Arriba”, en el que trabajaría su hermano Pedro y que presentó un estado ruinoso desde 1930 aproximadamente.

De modo que es el propio Aniceto el que continúa con sus hijos la tradición familiar. Y años más tarde es de nuevo Julio, el mayor de los varones, el que toma el relevo secundado luego por sus hijos Victoriano y Antonio. En 1970, Antonio Abán, el hermano pequeño de Victoriano, se ve obligado a abandonar el trabajo de la fundición ante las serias lesiones que le provoca en la espalda, y emigra a Madrid. Comienza la época de la imparable decadencia, el derrumbe del mercado a consecuencia de los cambios profundos que experimenta la sociedad tradicional en los años sesenta; se acentúan la falta de ventas y la penuria general a la que se ha enfrentado en solitario Victoriano Abán.

En la actualidad el Martinete de Navafría es un museo etnográfico y se ha declarado “Bien de Interés Cultural” el 17 de Diciembre de 1998 por la Junta de Castilla y León.

La importancia de este martinete radica en que es el único martinete de cobre que queda en Europa. Bien es cierto que quedan algunos martinetes de hierro en las antiguas ferrerías y que el ingenio que emplean para mover los martillos pilones es básicamente el mismo, pero la singularidad reside en el tamaño y la forma de la cabeza del martillo pilón, y que al ser el cobre un material más maleable y dúctil que el hierro este martillo tiene unas dimensiones menores. Además en las ferrerías, el martillo pilón se empleaba para realizar los trabajos típicos de la forja, para lo cual la cabeza del martillo debía tener una forma determinada. De hecho en las ferrerías solía haber dos cabezas intercambiables, una para trabajar el hierro y obtener láminas, y otra con una forma más adaptada a los trabajos del metal para obtener barras y realizar diferentes trabajos de forja. La cabeza del martillo pilón que tenían los martinetes de cobre y que posee el de Navafría tiene una forma redondeada, adaptada al trabajo de dar forma a los calderos y demás enseres que allí se realizaban.

En la actualidad se pueden visitar diversas ferrerías y museos etnográficos relacionados con el agua y su uso similares al que es objeto de estudio. Una de las más importantes es la herrería de Compludo, declarada Monumento Nacional en 1968. Se cuenta que la herrería fue fundada por San Francisco en el siglo VII. En la actualidad sigue funcionando, está enclavada en un tranquilo valle que fue solar de la primera fundación monástica visigótica berciana de la que quedan vestigios en el pueblo, cercano a la herrería.

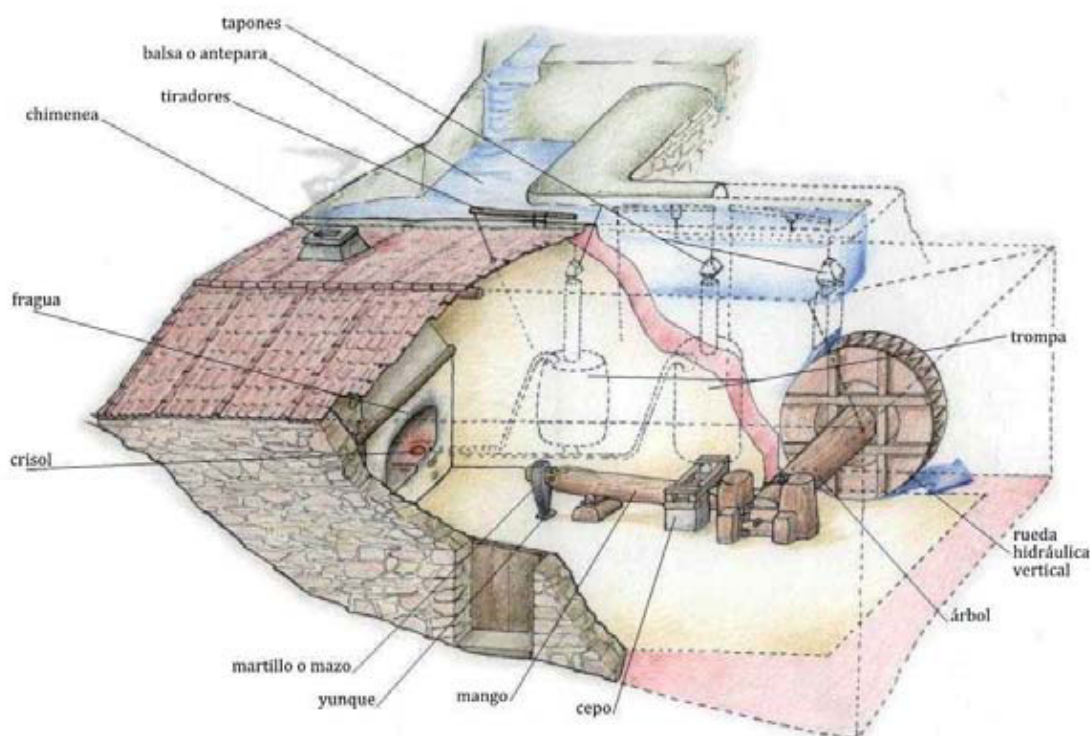
Si los ingenios hidráulicos llaman la atención es también interesante conocer el Museo de los Molinos de Mazonovo, donde se puede apreciar el funcionamiento de muy diversos ingenios hidráulicos y molinos de distintos tipos, algunos de los cuales tienen un funcionamiento similar al del martinete (caso del molino de mazos). El Museo de los Molinos de Mazonovo es el resultado de una iniciativa privada llevada a cabo por los hermanos López-Cancelos Rodríguez, herederos del “Molín de Rego” que es como se conocía ese molino en la zona. La iniciativa del museo surgió con la intención de que no se pierdan estos ingenios y con el objetivo de dar a conocer útiles, actividades y herramientas relacionados con ellos. Este museo no es meramente expositivo sino que busca que sea el visitante el que interactúe con los distintos elementos allí expuestos para que pueda comprender mejor el funcionamiento de todos los ingenios.

3.2 Descripción del Martinete

El Martinete de Navafría es un edificio antiguo muy singular, no por el edificio en sí, sino por el ingenio que alberga en su interior. Tal es su importancia que ha sido declarado Bien de Interés Cultural por la Junta de Castilla y León en 1998. (BOCYL-D-18061998-21).

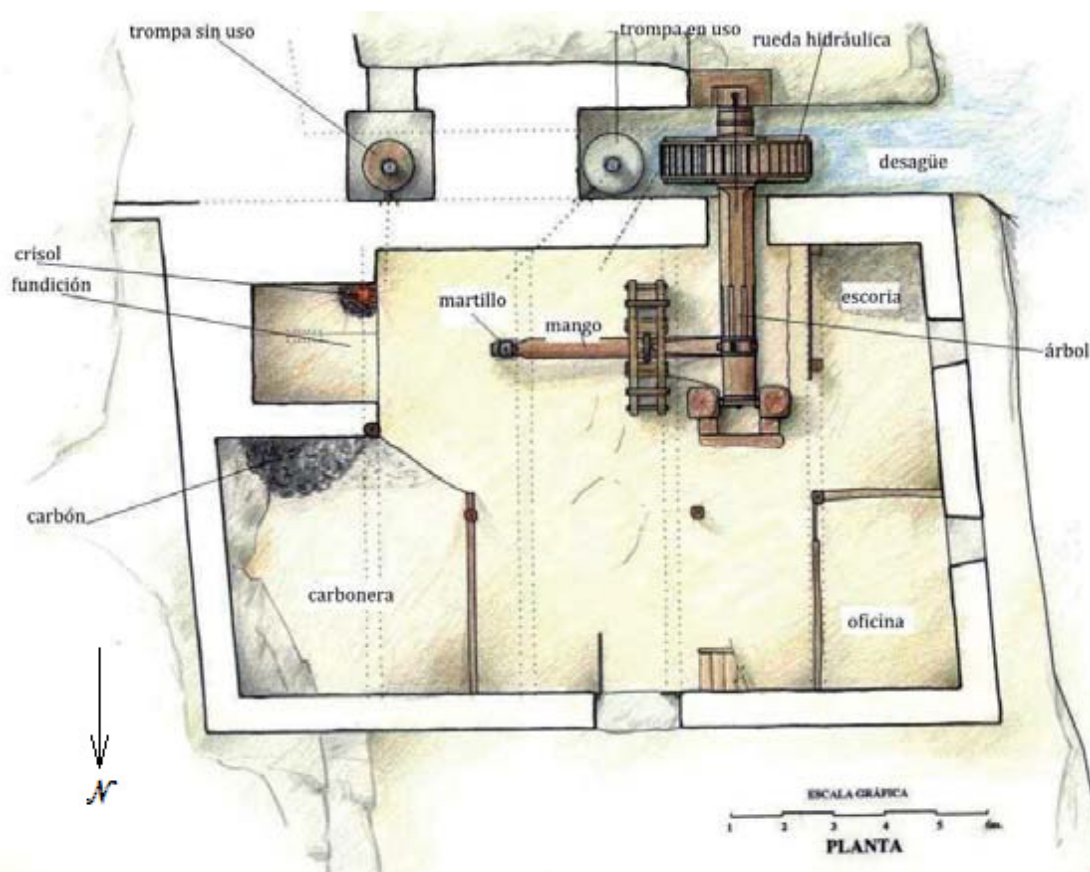
En el conjunto del Martinete se pueden distinguir varias áreas:

- El área de acceso al taller, que se utilizaba para la preparación de carbón vegetal de pino y como lugar de acopio del material usado en el Martinete.
- El área de captación del agua del río Cega y su canalización hasta el edificio del Martinete.
- El área del edificio, donde se alberga toda la instalación y maquinaria, tanto exterior como interior, que constituye el Martinete. Es en esta última área en la que se centrará el estudio.



Perspectiva del conjunto (autor J. Soler)

Dada la importancia de este ingenio se realizaron en 1999/2000 unas obras en las que se mejoraron los accesos, se protegió la propiedad realizando un vallado perimetral y se realizó un retejado de la cubierta.



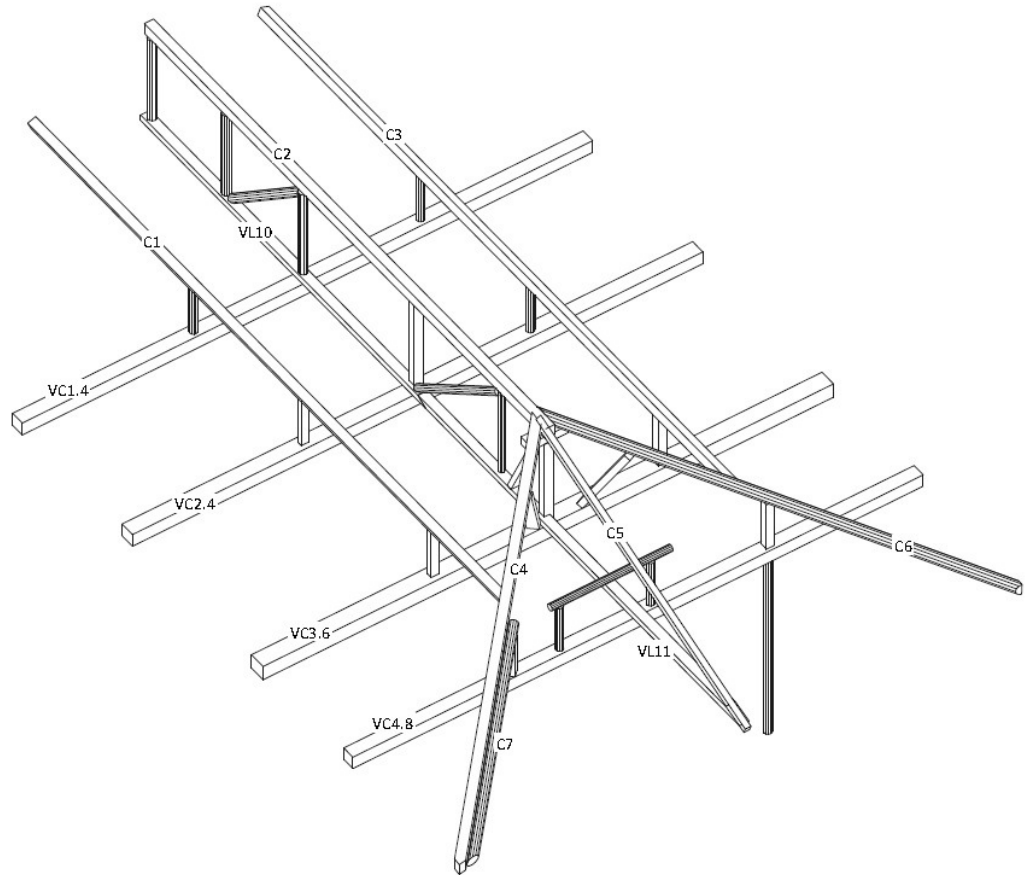
Planta del edificio. (Autor: J. Soler)

El edificio se construyó en torno a 1940, es de planta rectangular con unas dimensiones exteriores de 15x10 m. Los muros son de mampostería, con un espesor de unos 60 cm y la cubierta a tres aguas con teja segoviana. El paramento Sur forma parte de la antepara y tiene en el muro una abertura por donde sale el eje de la rueda. En la fachada Norte se encuentra la puerta de entrada y en el muro Oeste hay dos pequeñas ventanas. En el lado Este es el propio terreno el encargado del cerramiento, más un pequeño hastial. El interior está ocupado principalmente por el ingenio, a la izquierda de la entrada está la fundición y la carbonera y a la derecha la oficina y donde se acumula la escoria.

En la zona oeste del interior hay un pequeño entramado a 2,1 m de altura que cubre la oficina y la zona donde se acumulaba la escoria. Este entramado era utilizado para el almacenamiento de diversos materiales (calderos ya terminados, maderos de encina de repuesto para los pujones o levas, herramientas o piezas para mangos, etc.). En la actualidad acumula restos de diversa índole (alambre de espino retirado en las obras de mejora de 1999, restos de ripia, diversas piezas de madera de encina, un arcón, etc.). A este entramado se puede acceder mediante una escalera chapera situada en la esquina que forma la oficina con el muro norte.

3.3 Descripción de la cubierta

La cubierta está formada por tres aguas, como ya se ha indicado antes, y la estructura que la conforma es peculiar, debido a las irregularidades que presenta. La cubierta está sustentada por 4 vigas transversales sobre las que apoyan una viga longitudinal y unos enanos, que son los encargados de transferir las cargas de la cubierta a las vigas.



Perspectiva de la estructura de la cubierta del Martinete de Navafría.

En las tres vigas situadas más al Este apoya la viga longitudinal y tres enanos que sustentan las correas y la cumbrera. En la cuarta viga transversal, situada más al Oeste, se apoyan la viga longitudinal y 4 enanos que sirven de apoyo a las limatesas y al faldón del tercer agua.

Esta cuarta viga tiene un apoyo intermedio sobre un pilar.

Para el estudio y análisis de la estructura se ha nombrado y clasificado todas las piezas estructurales de la cubierta salvo los pares que se han estudiado de un modo conjunto, como se detallará más adelante.

Los faldones de la cubierta están conformados por una ripia de 2 cm de espesor. Encima de la ripia hay una capa de mortero con un espesor medio de 3 cm sobre el cual apoyan las tejas. Las tejas son de estilo árabe, con una disposición a la segoviana, esto es que sólo están las tejas de la canal.

4 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ESTUDIO


Este trabajo consiste en la inspección, estudio, evaluación y peritación del estado de la estructura de la cubierta de madera.

En la elaboración del presente estudio se procedió primeramente a una recopilación de la información sobre el Martinete. En esta primera fase se encontró mucha información del Martinete haciendo referencia al proceso de fabricación de los calderos y al funcionamiento del ingenio. Los documentos encontrados aparecen reseñados en la bibliografía. También se mantuvieron entrevistas con diversas personas relacionadas con el Martinete donde cabe reseñar, la ayuda aportada por Antonio, el carpintero amigo de la familia Abán que proporcionó información sobre las especies de madera empleada en la construcción de la cubierta. La buena predisposición de Jorge Miguel Soler Valencia, que aportó innumerable información sobre el ingenio hidráulico tanto del martinete, como de la trompa, así como numerosos ejemplos de diversas ferrerías por el Norte de la península y la localización de martinetes de cobre en el pasado; también hay que agradecerle los planos que ha puesto a disposición. Por otra parte, en el museo provincial de Segovia se encontró información que hace referencia al ingenio.


Una vez realizada la búsqueda de información referente al Martinete de Navafría se analizó y se observó que si bien, sí había bastantes estudios al respecto, todos ellos se centraban en el ingenio hidráulico y no se encontró información relativa a la estructura de la cubierta, de modo que se procedió a realizar un croquis de la cubierta.

El levantamiento del croquis se realizó mediante un medidor láser marca Bosch. Se optó por emplear el medidor láser por la comodidad que presentaba frente a la cinta métrica. Al ser la estructura tan compleja hubiera sido muy complicado el poder realizar las mediciones pasando la cinta de un extremo a otro dado el complejo entramado que presenta la misma.

En el proceso de toma de datos con el medidor láser hubo alguna dificultad dada la cantidad de polvo y telas de araña que había. Este hecho hizo que algunas medidas hubiera que repetirlas en otro momento una vez que se retiraron las telas de araña y el polvo se asentó. Mientras se realizó la toma de datos, se observó que el estado de la cubierta del Martinete era peor del que se esperaba en un principio.



Características técnicas	DLE 70 Professional
Margen de medición	0,05-70 m
Exactitud de medida	± 1,5 mm
Tiempo de medición	típ. < 0,5 s; máx. 4 s
Diodo láser	635 nm, < 1 mW
Clase de láser	2
Protección contra polvo y salpicaduras de agua	IP54
Conexión del trípode	1/4"
Tamaño	59 x 100 x 32 mm
Peso (pilas incl.)	180 g
N.º de pedido	0601016600
Suministro de serie	Bolsa de protección, asidero, 4 pilas de 1,5 V (AAA)



Especificaciones técnicas del DLE 70 Professional

Equipo láser empleado en el levantamiento del croquis

En la toma de datos se observó que una de las vigas principales presentaba una rotura total, lo que ocasionó un ligero hundimiento de la cubierta y una sobre flecha en la siguiente viga. Lo cual se comunicó a la propiedad y se aconsejó el apuntalamiento de la estructura.



Detalle de la rotura observada en la inspección inicial

Se observó la presencia de diversos ataques bióticos en las diversas piezas, que se detallarán más adelante.

Una vez realizado el croquis de la estructura de la cubierta se procedió a la catalogación y medición de las dimensiones de todas y cada una de las piezas, donde se anotó la longitud y la sección de cada una. Para ello, se procedió a identificar una a una las piezas mediante un código alfanumérico que se detalla a continuación.

La metodología empleada en la nomenclatura fue la siguiente: nos situamos en el lado Este de modo que ese es el punto de vista de referencia y así la pared Sur sería la ubicada a nuestra izquierda y la norte a nuestra derecha. La estructura se dividió en 7 grupos para su croquización y estudio:

- 4 grupos transversales al eje longitudinal del edificio formados por las vigas principales transversales y los enanos.
- Un grupo formado por la viga longitudinal y los diversos elementos que sobre ella apoyan.
- Otro grupo constituido por las piezas de cubierta de correas y limas.
- En un último grupo se estudiaron de forma conjunta los pares.

Los 6 conjuntos formados por los 4 grupos transversales, la viga longitudinal y sus elementos y los elementos de cubierta de correas y limas se numeraron de Este a Oeste con un código alfa-numérico.

Las letras que se asignaron fueron:

- VC para los elementos transversales.
- VL para los elementos longitudinales.
- C para los elementos de cubierta correspondientes a las dos correas, la cumbrera y las limas.

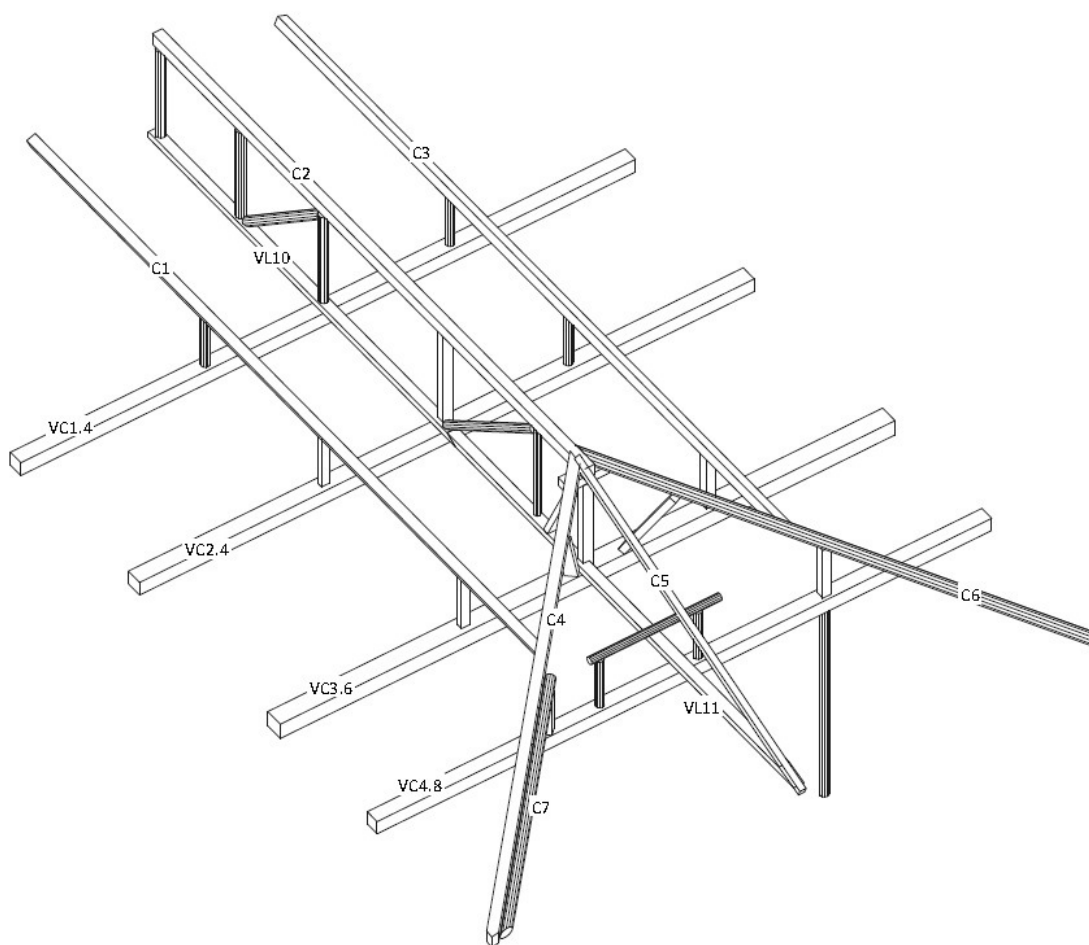
Los elementos transversales se numeraron con 2 números, el primero que determina el grupo transversal al que corresponde, del 1 al 4 siendo el VC1 el elemento situado más al Este. El segundo número corresponde al lugar que ocupa dentro del conjunto, habiéndose empezado a numerar de Sur a Norte, lo que equivale de izquierda a derecha según el

punto de vista de referencia. De modo que el enano situado a la izquierda del primer elemento es: VC1-1 (ver planos).

Los elementos de la viga longitudinal se nombraron simplemente con un número que indicaba su posición, siguiendo el eje Este-Oeste marcado por la pieza. Esto ha generado que haya piezas, que al coincidir en el conjunto longitudinal y en el conjunto transversal se nombren de dos formas. En un principio se planteó nombrarlas sólo de un modo pero al final se ha decidido mantener los dos nombres, al ser solamente 3 y al estimar que esta nomenclatura, dada la irregularidad de la estructura y la división en pequeños grupos bien diferenciados para su estudio, presentaba más ventajas que inconvenientes. Las correspondencias sinónimas son:

- VL4 se corresponde con VC1-2.
- VL5 es equivalente a VC2-2.
- VL9 es sinónimo a VC3-3.

El resto de elementos de la cubierta correspondiente a las correas, la cumbrera y las limas se nombraron con la letra C seguida de un número que indica su orden. El criterio de orden en este caso se puede observar en los planos.



Perspectiva de la estructura de la cubierta del Martinete de Navafría.

Se realizó una toma de datos pieza a pieza y se empleó la codificación antes mencionada para la localización y determinación de las piezas que conforman la estructura de la cubierta. Se quedó sin medir directamente la pieza VC1-3, dada la ubicación ya que no es accesible con unas condiciones mínimas de seguridad. Las dimensiones estimadas para esta pieza han sido las de la pieza VC1-1. (Ver anexo dimensiones y observaciones iniciales).

Las medidas se han expresado en cm para especificar el ancho y el alto de la pieza y en metros para longitud. En la medición de la sección de las piezas se ha empleado un flexómetro para las piezas escuadradas y una cinta métrica para los rollizos, de los cuales se ha medido el perímetro con la cinta métrica y posteriormente se ha calculado el diámetro. El nivel de precisión de las medidas ha sido el cm. Los equipos de medida permitirían mayor exactitud (hasta medio milímetro en el caso del flexómetro y hasta el milímetro en el caso de la cinta métrica) pero dada la irregularidad de las piezas se ha estimado oportuno y suficiente el empleo del centímetro como nivel de precisión.

En la toma de datos se han empleado diversos estadillos diseñados previamente en gabinete para adecuarse a las necesidades del caso. De este modo se ha conseguido optimizar los recursos y disminuir el tiempo de muestreo. Los diversos estadillos se podrían agrupar en dos grandes grupos:

- Uno que correspondería con la toma de datos referente a las dimensiones y que se emplea con el fin de recabar información para la esquematización de la cubierta y la realización de los planos.
- Otro que correspondería a los estadillos empleados en la recogida de datos de los Ensayos No Destructivos realizados.

A continuación se entra más en detalle en los estadillos referentes a las Técnicas No Destructivas empleadas.

Para la realización del muestreo y la toma de datos se diseñaron diversos estadillos para cada equipo de modo que se facilitara la labor de recogida de datos. Estos estadillos se realizaron una vez hechos los croquis y la asignación de un código a cada una de las piezas. Esto permitió una recogida de información de una manera sistematizada, rápida y eficaz. A continuación se muestran los estadillos que se emplearon.

PIEZA	PILODYN	OBSERVACIONES
	PROF. DE PENETRACIÓN	

			<u>MICROSECOND TIMER</u>			fecha:
PIEZA	HUMEDAD %	TIEMPO (μ s)	LONGITUD (mm)	ÁNGULO (ancho)	VELOCIDAD (mm/s)	OBSERVACIONES
					H	

PIEZA	FUERZA DE EXTRACCIÓN (kN)	profundidad del tornillo(mm)

PIEZA	HUMEDAD %		HUMEDAD AMBIENTE	
		FECHA	Tª	

Estos estadillos se rellenaron y una vez recogida la información se informatizó para poder manejarla. Se creó una tabla conjunta con toda la información (ver anexos).

5 IDENTIFICACIÓN DE PATOLOGÍAS

Una vez que se tenía las piezas medidas y catalogadas se procedió a una inspección visual con el objeto de identificar y cuantificar en una primera aproximación los daños presentes en la estructura. Se procedió a estudiar y fotografiar una a una las diversas piezas y mediante un punzón se fue inspeccionando cada una de las piezas.

Mientras se realizaba esta inspección también se recogieron muestras en bolsitas de plástico que se etiquetaron de los diversos restos que se encontraban en las piezas.

Las patologías que puede presentar la madera se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Patologías de origen biótico
- Patologías de origen abiótico
- Patología de origen estructural

5.1 Patologías de origen biótico

Las patologías de origen biótico son aquellas relacionadas con organismos xilófagos, es decir, que se alimentan de la madera. Dentro de este grupo se puede distinguir cinco grandes grupos que son: hongos xilófagos, Insectos de ciclo larvario, insectos sociales (o termitas), otros insectos y xilófagos marinos. A continuación se describirá aquellos que afectan al Martinete, pudiéndose ampliar información en relación a los otros grupos en la bibliografía reseñada.

5.1.1 Hongos xilófagos

Los hongos son unos seres vivos de organización celular muy primitiva, que viven de forma saprófita (alimentándose de elementos muertos) o en forma parásita (alimentándose o creciendo de las sustancias de otros animales o vegetales con quien vive unido). Los hongos se detectan por un color anormal de la madera, también por la degradación que en ella originan, así como por su manifestación en superficie (en forma de micelios o de cuerpos de fructificación), un olor característico o por los insectos xilófagos cuyo ataque favorecen.

El desarrollo de los hongos xilófagos se inicia con la germinación de las esporas que caen sobre la madera. Comienzan su ataque mediante la penetración pasiva de las hifas (células muy finas sólo visibles con microscopio) a través de los orificios naturales de la madera, siendo su acción puramente mecánica. Una vez invadida la madera físicamente, empieza la destrucción bioquímica o penetración activa, poniéndose en juego todo el sistema enzimático, que permite descomponer los constituyentes de la madera.

Los factores que tienen mayor influencia en el desarrollo de los hongos son la humedad de la madera, la temperatura del aire y la presencia de oxígeno. De todos ellos la humedad es quizá el más importante para la fisiología de los hongos y es indispensable para la germinación de las esporas, la digestión de la madera por las enzimas, el transporte de las sustancias de alimentación y la realización de todas las funciones vitales.

El contenido mínimo de humedad en la madera que permite su desarrollo se encuentra en torno al 18-20%. En el momento que la madera alcanza unos contenidos de humedad superiores a estos valores está expuesta al ataque de estos patógenos, y al contrario, si

está por debajo de estos valores no pueden desarrollarse. La humedad óptima se encuentra en torno al 35-50%, siendo el límite superior el 175%. Este hecho se ha empleado en el Martinete para la conservación del mecanismo ya que dispone de unos canalillos y diversos tubos, que mantienen constantemente húmedo el árbol y la noria lo que produce que esté saturado de agua y no permita el desarrollo de los hongos.

Dentro de los hongos xilófagos se pueden diferenciar dos grandes grupos: uno primero formado por los mohos y los hongos cromógenos y otro segundo formado por los hongos de pudrición.

5.1.2 Mohos y hongos cromógenos

Los mohos se alimentan de las sustancias almacenadas en el lumen celular (en el interior). Son incapaces de alimentarse de los principales componentes que forman la pared celular (celulosa o lignina), por lo que no ocasionan pérdidas significativas en la resistencia de la madera. Sus hifas son incoloras y su crecimiento sólo se detecta cuando se forman esporas en la superficie de la madera (color oscuro) o cuando el cuerpo de fructificación forma sobre la superficie una especie de pelusilla (proliferaciones algodonosas) transparente, o con tonalidades que van desde el color blanco al negro. Debido a su crecimiento superficial son fáciles de eliminar con un trapo o mediante medios mecánicos. Aunque no resultan peligrosos estructuralmente por su mínima acción degradadora, crean las condiciones necesarias para el desarrollo de los hongos de pudrición.

Los hongos cromógenos son, al igual que los mohos, poco importantes en la influencia sobre las propiedades físico-mecánicas de la madera, ya que las hifas de éstos sólo se alimentan del contenido celular de las células de la madera, sin producir degradaciones en la pared celular. Se caracterizan porque producen decoloraciones, como el azulado, tonos verdes, el corazón rojo y la madera pasmada del haya.



Detalle de hongos y mohos presentes en el Martinete.

5.1.3 Hongos de pudrición

Los hongos de pudrición son los que producen daños graves en la madera. Se alimentan de los componentes de la pared celular llegando a provocarla destrucción completa de ésta. Las hifas emiten unas sustancias químicas (enzimas) que disuelven los componentes de la pared que le sirven de alimento para desarrollarse. En las etapas iniciales no es fácil de reconocer ya que las hifas permanecen ocultas en su interior. Según va desarrollándose la pudrición se va acentuando el cambio de color y la madera comienza a perder peso. En la fase final del proceso se llega a la disgregación total de la estructura con una pérdida total de sus propiedades mecánicas. En la práctica la pudrición solo se produce en maderas húmedas. Aunque la pudrición puede empezar a partir de un contenido de humedad del 22%, la pudrición rápida comienza a partir de contenidos de humedad superiores al 26%.

Una vez que se ha formado el micelio, las hifas pueden formar “ramas o agrupaciones de hifas” capaces de conducir agua y alimentos lo que hace que aumente el contenido de humedad de la madera. La presencia o no de estas ramas permite identificar a algunos hongos. La clasificación de las pudriciones es difícil ya que no existen parámetros fijos, siendo la más aceptada la que aúna el color de la madera atacada junto el aspecto que presenta, aunque sigue siendo imperfecta. Los tipos de pudrición se clasifican según este criterio artificial en pudriciones pardas, pudriciones blancas y pudriciones blandas.

5.1.4 Pudrición parda

La pudrición parda está provocada por hongos que concentran fundamentalmente su ataque sobre la celulosa y la hemicelulosa, dejando un residuo color marrón oscuro formado por lignina, que puede disgregarse fácilmente con los dedos, teniendo éste una textura pulverulenta.



Detalle de pudrición parda.

Los hongos de pudrición parda producen un laminado en tres direcciones perpendiculares, originando unos pequeños paralelepípedos que dan a la madera un aspecto muy característico, similar a la madera quemada, formando como pequeñas estructuras de cubos o prismas. Esto hace que también se la conozca como pudrición cúbica. El ataque inicial de estos hongos favorece el ataque posterior de los insectos de ciclo larvario (generalmente anóbidos). Este tipo de pudrición requiere humedades relativas del 30 al 60 %, afecta a la albura y al duramen tanto de frondosas como de coníferas.

5.1.5 Pudrición blanca

La pudrición blanca está originada por hongos que se alimentan preferentemente de la lignina, aunque también, en menor grado de la celulosa. La madera atacada toma un color blancuzco debido al complejo celulósico resultante. Es un complejo de celulosa más o menos blanquecino que rara vez es del todo uniforme, sobre el que aparecen vetas blancas separadas por zonas de madera normal. Digieren casi por completo la lignina, atacando parcialmente a la celulosa y dejando un residuo fibroso que conserva una resistencia elástica apreciable, por lo que se le conoce también como pudrición fibrosa, al

presentar un aspecto y una textura al desmenuzarlo entre los dedos como si de fibras se tratase.



Detalle pudrición blanca.

Se la conoce también como pudrición corrosiva o deslignificante. Requiere humedades relativas del 30-60 %. Generalmente afecta más a las maderas de frondosas que a las de coníferas, debido a que éstas tienen un mayor contenido de lignina y afecta sólo a la albura.

5.1.6 Pudrición blanda

La pudrición blanda está originada por hongos inferiores (Ascomicetos), cuyas hifas se desarrollan en el interior de la pared celular de las células de la madera y atacan principalmente a la celulosa de la pared secundaria. La madera atacada tiene un aspecto final blando o esponjoso, parecido al del queso fresco, del cual toma su nombre. Esta pudrición se produce cuando existen altas condiciones de humedad tanto en el ambiente como en la madera, caso que se produce en los pares de nuestro estudio. Cuando la madera atacada por una pudrición blanda se seca, su superficie se rompe formando muchos cubos pequeños. Este tipo de pudrición se detectó por primera vez en las torres de refrigeración, cuyas piezas tienen un contenido de humedad demasiado alto para que sean atacados por los hongos de las pudriciones pardas o blancas.

5.1.7 Insectos de ciclo larvario

Los insectos de ciclo larvario que se han encontrado en la estructura, pertenecen al grupo de los coleópteros. Su característica común es que se alimentan de la madera durante su fase de larva. Durante su ciclo de vida, estos insectos, cambian de forma mediante un proceso que se denomina metamorfosis, pasando por cuatro estadios de desarrollo que son: huevo, larva, pupa e insecto adulto o imago. El tiempo requerido para el desarrollo de todos los estados se conoce como “duración de la generación”. Este tiempo es diferente para cada especie, y también se ve influenciado por las condiciones del medio. Las fases de huevo pupa e imago son por lo general de corta duración y varían desde varios días hasta semanas; el tiempo más largo corresponde, por lo general, a la fase larvaria, etapa en la cual se produce la degradación de la madera para satisfacer las necesidades alimenticias de la larva.

El ciclo biológico comienza cuando las hembras colocan sus huevos (muy pequeños e indetectables al ojo humano) en lugares como fendas, ranuras u orificios de la madera, donde estarán protegidos. De estos huevos nacerán las pequeñas larvas que comienzan a alimentarse de la celulosa, la lignina y otros componentes de la madera, generando en estas galerías características a cada especie que pueden modificar las propiedades mecánicas de la madera, disminuyendo su capacidad resistente. Las larvas permanecen en el interior de la madera un periodo muy variable en función de la especie que puede ir desde unos meses hasta más de diez años y es esta fase cuando se producen los daños en la madera.

Cuando la larva se aproxima al final de su ciclo de vida, se acerca a la superficie de la madera, donde crea una cámara especial totalmente aislada y se empupa. Una vez transformada en pupa sigue su proceso de metamorfosis hasta convertirse en un insecto adulto con alas. Éste rompe la cámara de pupación y la fina capa de madera que queda superficialmente y sale al exterior para aparearse cerrándose así el ciclo en el momento en que la hembra vuelva a colocar los huevos en la madera.

El desarrollo de los insectos xilófagos está influido por diferentes condiciones, cuyas limitaciones dependen del insecto en cuestión. Las principales condiciones que afectan al desarrollo de los insectos son la especie de madera, existiendo insectos especializados en madera de frondosa otros en madera de coníferas y otros que atacan indistintamente a

coníferas y frondosas. También influye el contenido de humedad de la madera, determinados insectos atacan sólo a maderas secas, otros a maderas muy húmedas y otros son indiferentes pudiendo atacar madera con cualquier contenido de humedad, si bien es cierto que si la madera está saturada no podrían desarrollarse al no poder respirar. La temperatura es otro factor muy influyente en el desarrollo del ciclo de vida de los insectos. Los insectos al no poder regular la temperatura de su cuerpo dependen de la temperatura del medio, por lo que influye en la duración del ciclo de vida, tanto en el desarrollo de las larvas como en el comportamiento de los insectos adultos en aspectos tales como copulación, ovoposición, pupación y vuelo. El ataque previo originado por los hongos de pudrición también es un factor influyente ya que prepara la entrada y facilita el ataque de algunos insectos xilófagos, como es el caso de los anóbidos que frecuentemente se asocian a ataques previos de pudrición.

Para la identificación de los insectos que han producido los daños, no es frecuente disponer de larvas o adultos, por lo que las claves que se emplean se basan en señales dejadas en la madera. Las señales empleadas son: forma y dimensión de los orificios de salida, dirección de las galerías que perforan en el interior de la madera, el tipo de detritus (o serrín) que producen y su localización en el interior de las galerías. Además el tipo de especie de madera y su contenido de humedad, ayuda también en la determinación de las especies posibles.

Los principales coleópteros xilófagos que podemos encontrar en España y que atacan a la madera puesta en obra son: Anóbidos, vulgarmente conocidos como carcoma, Cerambícidos, también conocidos como carcoma gruesa, Líctidos o polillas, Curculiónidos también llamados gorgojos de la madera y Bostríchidos. A continuación se describirán aquellos que se han detectado en el Martinete.

5.1.8 Anóbidos

Los anóbidos son pequeños coleópteros que, en estado adulto, alcanzan de 3 a 11 mm de longitud. Son conocidos vulgarmente como carcoma y son el ataque característico de los muebles antiguos, aunque también atacan a las piezas estructurales. Son una familia de coleópteros formada por más de 1600 especies, siendo las especies más frecuentes en la construcción en España *Anobium punctatum* De Geer y *Xestovium rufovillosum* De Geer.

Los adultos, de color oscuro, tienen una forma más o menos cilíndrica, y la cabeza a menudo queda cubierta por una especie de capuchón denominado pronoto.



Fotografía de un ejemplar encontrado en el Martinete realizada en el laboratorio de Industrias de la madera de la E.U.I.T. Forestal.

Las hembras, que generalmente son de mayor tamaño, una vez fecundadas ponen sus huevos en las superficies rugosas de la madera, en fendas e incluso en antiguos orificios de salida.

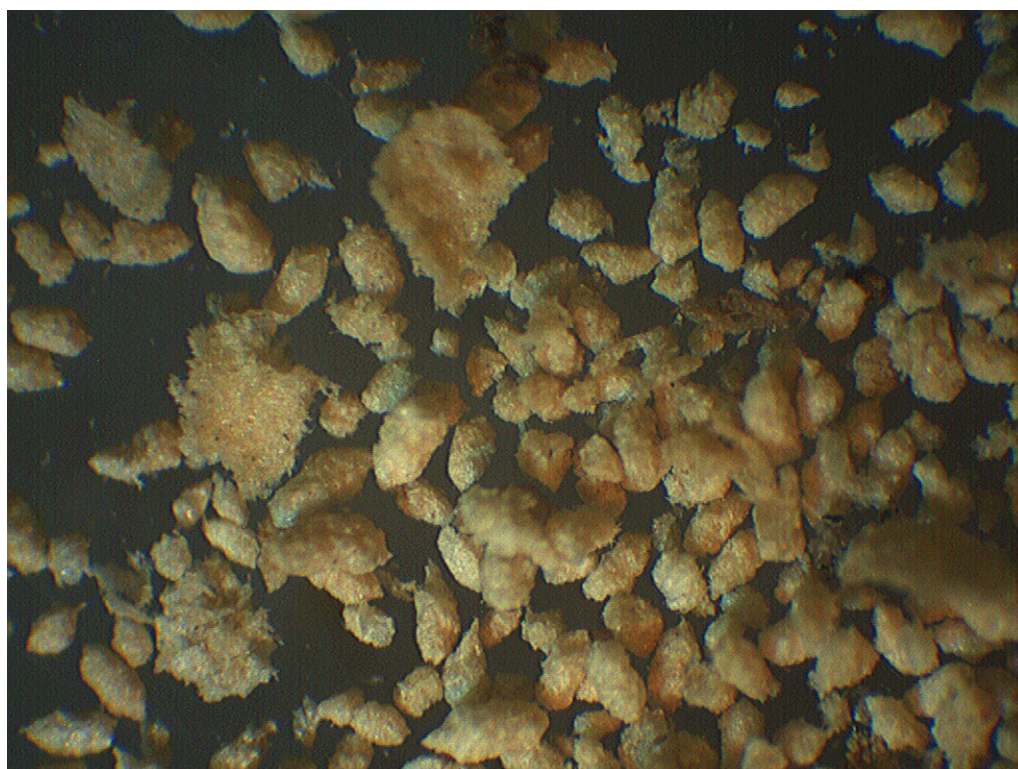
Después de 4-5 semanas nacen de los huevos pequeñas larvas blanquecinas y arqueadas que penetran en la madera perforando, mediante sus potentes mandíbulas, galerías paralelas a la fibra y de sección circular, con un orificio de salida en los insectos adultos de 1 a 4 mm de diámetro. El período de vuelo es bastante amplio, comenzando en primavera y finalizando en septiembre. La duración de su ciclo vital varía según la especie, condiciones ambientales y calidad nutritiva de la madera, pudiendo llegar a durar un ciclo completo hasta 3 ó 4 años, siendo el mínimo de un periodo de 8 meses, y en general se puede estimar de 2 a 3 años.

Atacan tanto a coníferas como a frondosas, alimentándose de celulosa. Hay especies especializadas en las maderas de coníferas y otras en las de frondosas. Por lo general,

afectan a la madera de albura y preferentemente con cierto contenido de humedad. Es frecuente que su ataque acompañe al de los hongos de pudrición.

Su identificación se ha realizado mediante la identificación de ejemplares que se han encontrado y fundamentalmente mediante las muestras obtenidas de los restos hallados en las piezas.

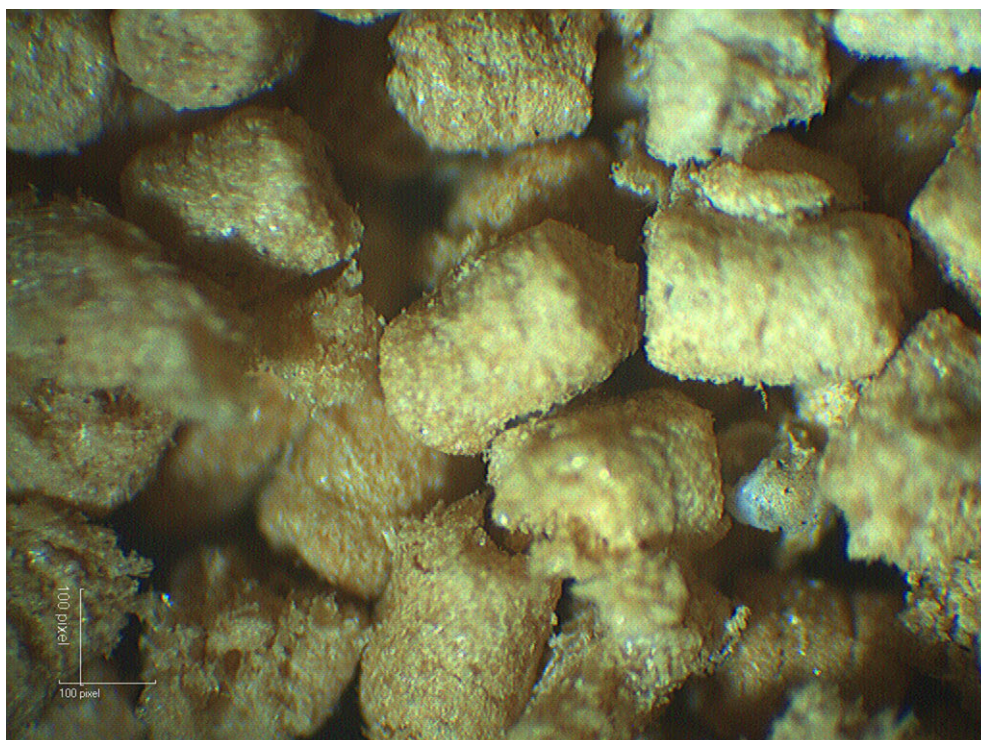
Los restos de serrín que dejan los anóbidos se caracterizan por ser basto, con unas formas elípticas, ligeramente ahusadas similares a diminutos limones. Es rugoso al tacto y queda suelto en el interior de las galerías. Está formado por virutas de madera y excrementos, su granulometría es mayor que el producido por los líctidos.



Detalle de restos dejados por anóbidos. Fotografía realizada en el laboratorio de Industrias de la madera de E.U.I.T. Forestal.

5.1.9 Cerambícidos

Los cerambícidos son insectos coleópteros conocidos vulgarmente como carcoma gruesa, gigante o grande. De las familias de xilófagos que afectan a la madera puesta en obra, los Cerambícidos son los de mayor tamaño que existen en España. Las especies más habituales que encontramos en la madera puesta en obra en España son: *Hylotrupes bajulus* L., *Hesperophanes cinereus* Vill. y *Ergates faber* L.



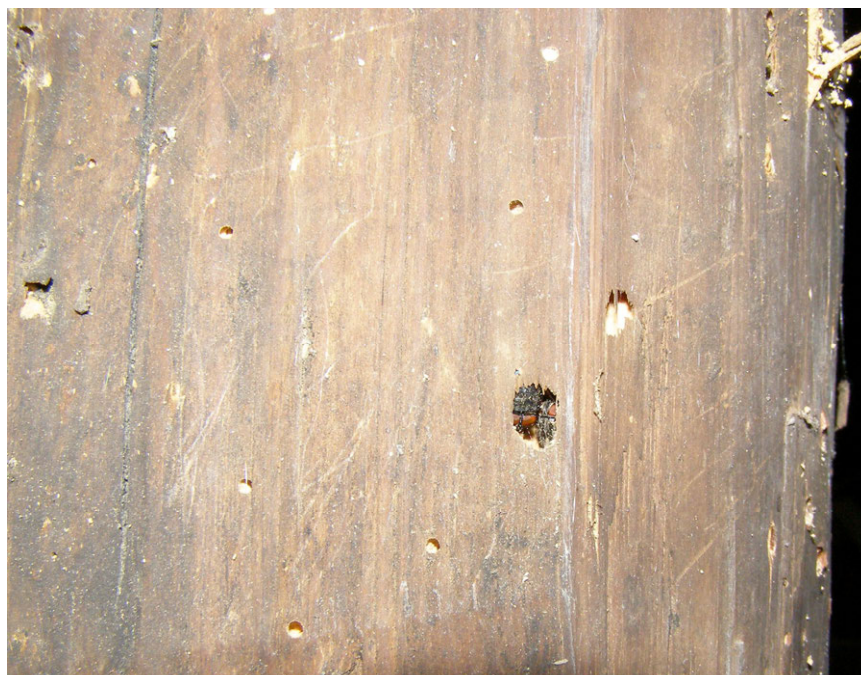
Detalle de los restos dejados por cerambícidos. Fotografía realizada en el laboratorio de Industrias de la madera de E.U.I.T. Forestal.

Por lo general sólo se alimentan de la albura de la madera , por lo que los daños en piezas con gran contenido de duramen es limitado.

Los adultos son generalmente de gran tamaño y poseen dos largas antenas. Las larvas, de anillos bien marcados, presentan una forma cilíndrica y un color blanco amarillento. Poseen fuertes mandíbulas que utilizan para excavar las galerías, quedando estas marcadas con unas estrías que se pueden observar con lupa.

Por lo general el ataque de *Hylotrupes bajulus* L. (especie más común en coníferas) se da en maderas secas (entre el 10 y el 14% de humedad), en particular en las estructuras de

cubiertas. La larva puede alcanzar una longitud de 30 mm, con un diámetro de unos 6 mm y es de color blanco plateado. Las galerías son de sección oval, a menudo paralelas a la fibra, y con paredes estriadas, debido a los mordiscos de las mandíbulas de los cerambícidos. El serrín es bastante grueso y basto. Posee una forma cilíndrica, pudiendo recordar a la que tienen los pelets. Este serrín permanece en el interior de las galerías ya que éstas están cerradas por una fina película de madera que las larvas dejan intacta. Los orificios de salida son de sección oval.



Detalle donde se observan la cabeza de dos dípteros.

El insecto adulto de los cerambícidos tiene una longitud de 10 a 20 mm, pudiendo llegar en algunas especies a los 50 mm. El ciclo vital puede durar de 2 a 12 años, dependiendo de la temperatura, la humedad y el valor nutritivo de la madera atacada.

Los orificios de salida tienen una forma elíptica con un diámetro de 6 a 12 mm.

Se ha encontrado que estos orificios pueden ser utilizados por otros insectos como cámaras de pupación o como cobijo (caso de dípteros encontrados).



Detalle de un díptero entrando en la galería formada por los cerambícidos.

5.1.10 Curculiónidos

Los Curculiónidos o gorgojos de la madera son un grupo de especies cuyo ataque no comenzó a identificarse en la madera de construcción en España hasta hace unos 20 años. Los signos de su ataque pueden confundirse fácilmente con el de los anóbidos.

En España se han identificado tres especies que ataquen a la madera de edificios antiguos, *Pselactus spadix* H., *Hexarthrum exiguum* B. y *Amaurrhinus bewickianus* W.

Sus daños son muy parecidos a los que producen los anóbidos, por lo que es difícil diferenciar su ataque. Atacan a la madera de albura de las frondosas y las coníferas, pudiendo atacar a la madera de duramen si existen daños previos ocasionados por hongos. Requieren una humedad en la madera mayor o igual al 20%.

Las galerías que realizan las larvas (y también los insectos adultos) en la madera de albura son de sección circular y similares a las de los anóbidos. El serrín que producen es similar al de los anóbidos pero algo más fino y de forma heterogénea. Este hecho ha sido el que ha permitido determinar la presencia de estos xilófagos al observar mediante lupa binocular una muestra obtenida en la pieza VC4-3, donde se apreciaban restos de menor tamaño y más heterogéneos que en el resto de muestras.

Los orificios de salida son de forma circular con un diámetro de 1 a 2 mm. La duración del ciclo biológico en algunas especies es de 1 año, y en otras pueden llegar a 2 años. Los insectos adultos tienen una longitud de 3 a 5 mm.

5.2 Patologías de origen abiótico

Las patologías de origen abiótico que se pueden producir en la madera son originadas fundamentalmente por los agentes atmosféricos (el sol, la lluvia y el hielo), los agentes químicos y el fuego.

Una de las principales causas del deterioro superficial de la madera se debe a los cambios rápidos del contenido de humedad de la capa externa. El agua de lluvia que moja la superficie de la madera sin protección es absorbida rápidamente por la capa superficial de la madera seguida de la adsorción en las paredes de las células. El vapor de agua es recogido directamente por las paredes de las células.

La diferencia de humedad entre el interior y la capa superior, que se tiende a hinchar, provoca un estado de tensiones en la pieza que ocasiona curvaturas, alabeos y fendas.

La radiación solar actúa principalmente a través de los rayos ultravioleta y los infrarrojos. Los rayos ultravioleta afectan superficialmente a la madera degradando primeramente la lignina. La radiación infrarroja produce una degradación indirecta debido al calentamiento de la madera que genera la aparición de fendas.

Otra de las patologías importantes que se producen en el Martinete es la debida a la acción del hielo. Dada la situación del Martinete, a los pies de la sierra de Guadarrama donde se producen frecuentes heladas, origina que todo el agua que tiene la madera se congele. Al congelarse aumenta su volumen y rompe la estructura de la madera. Esto ocurre fundamentalmente en la parte más superficial y en determinadas piezas que están saturadas constantemente, donde se aprecia una primera capa que carece de la estructura típica de la madera y presenta una más fibrosa, carente de cohesión. Esta estructura es similar a la que presenta la pudrición blanda.



Detalle de las heladas que sufre el Martinete.

5.3 Patologías de origen estructural

Las patologías de origen estructural son aquellas relacionadas con la estabilidad y resistencia, pudiendo resumirse en los siguientes grupos:

- Sección insuficiente para las cargas que actúan o como consecuencia de un aumento de las cargas con respecto al origen de la estructura.
- Deformaciones elevadas debido al efecto de fluencia en piezas colocadas en verde y roturas a largo plazo.
- Fallos en las uniones debidas a un dimensionado insuficiente o a un diseño incorrecto y posible incremento de la deformación.
- Roturas en alguna pieza con defectos locales muy superiores a los medios en la estructura.
- Arriostramiento insuficiente que conduce al desplome y pérdida de verticalidad de parte de la estructura.

En general los fallos debidos a patologías de origen estructural se suelen manifestar poco tiempo después de la construcción, normalmente después de las primeras cargas de importancia debido al uso de la nieve. Sólo en algunas ocasiones en las que la pieza está dimensionada de manera insuficiente para las cargas de larga duración, la rotura se puede producir al cabo de varios años. Pero en este caso las deformaciones son muy exageradas y van aumentando paulatinamente.

6 ESTADO ACTUAL. RESULTADO DE LA INSPECCIÓN.

A continuación se reseña un resumen de las patologías que se han encontrado en las diversas piezas de la estructura una vez realizada la inspección e identificación.

La información se fue anotando pieza a pieza y posteriormente se sistematizó para facilitar su manejo (ver anexo sobre patologías). En el proceso de identificación de las patologías fue muy importante el etiquetado y la recogida de muestras para confirmar la identificación de los agentes patógenos. Una vez realizada la confirmación de los agentes patógenos se procedió a realizar unos croquis indicando el grado de ataque que presentaba la estructura en función de las diversas patologías encontradas.



Detalle de las diferentes muestras recogidas y etiquetadas para su posterior identificación en laboratorio.

Se ha empleado una escala con 5 grados diferentes de ataque, desde nada atacado (1), hasta muy atacado (5). Esta graduación depende de las patologías y por ello a continuación se exponen los criterios.

La definición de la escala del grado de ataque en el caso de los anóbidos es la siguiente: se considera grado 5 cuando la separación entre los orificios de salida de los anóbidos es menos de 1,5 cm de media y grado 1 cuando no hay ataque, caso que en esta estructura no se da.

En el caso de ataque por cerambícidos el grado 5 se asignaría a piezas totalmente atacadas en toda su superficie de albura siendo el grado 3 asignado a piezas que si bien

no en su totalidad, sí están atacadas en buena parte de ellas, llegando a ocupar el ataque entre el 50-60% de la albura de la pieza.

Tanto en el ataque de anóbidos como en el de cerambícidos se ha empleado la misma escala gráfica, basada en 5 colores para representar los diferentes grados de ataque. En blanco se han dejado las piezas que no se han podido clasificar debido a la inaccesibilidad que presentaba. Se decidió no evaluar esas piezas y considerar un ataque similar al de las colindantes debido a la homogeneidad que presentaba el ataque en las piezas que sí se han podido evaluar, y sobre todo por motivos de seguridad.

Un esquema diferente se ha seguido en el caso de los daños por hongos y agentes abióticos. En este caso se ha identificado sólo aquellas piezas en las cuales se observaba una rotura aparente, una pudrición, o bien en la inspección se profundizaba con el punzón más de 10 mm. La decisión de tener en cuenta en la detección de patologías de más de 10 mm se ha basado en ensayos con ese mismo punzón sobre diferentes piezas de madera sana, y se comprobó que se obtenían valores de penetración entorno a los 6-9 mm como máximo. A partir de estos valores se ha decidido representar las piezas que en la inspección inicial daban un valor mayor de 10 mm como piezas con una posible patología. Si bien quizá no en todas haya una pudrición aparente y bien definida, sí que presentan una degradación significativa, que ha podido ser originada por los diferentes y bruscos cambios de temperatura (no hay que olvidar que el edificio era una fragua y no tiene prácticamente aislamiento del exterior) y la alta humedad debido a la propia ubicación del edificio, al sistema que mantiene permanentemente mojado el árbol del Martinete y a las innumerables goteras que presenta el edificio.

Se ha desestimado representar los pares y las correas debido a que después de un análisis visual se comprobó que en un 70% presentaban un alto grado de pudrición hasta el punto de penetrar totalmente con el punzón y atravesar toda su sección. Estos daños de pudriciones se deben al mal estado de la cubierta, ya que como se pudo observar hay numerosas goteras lo que produce un alto grado de humedad y unas condiciones óptimas para el desarrollo de los patógenos. Por estos motivos se ha descartado su representación considerando oportuno el sustituir todos los pares de la cubierta.

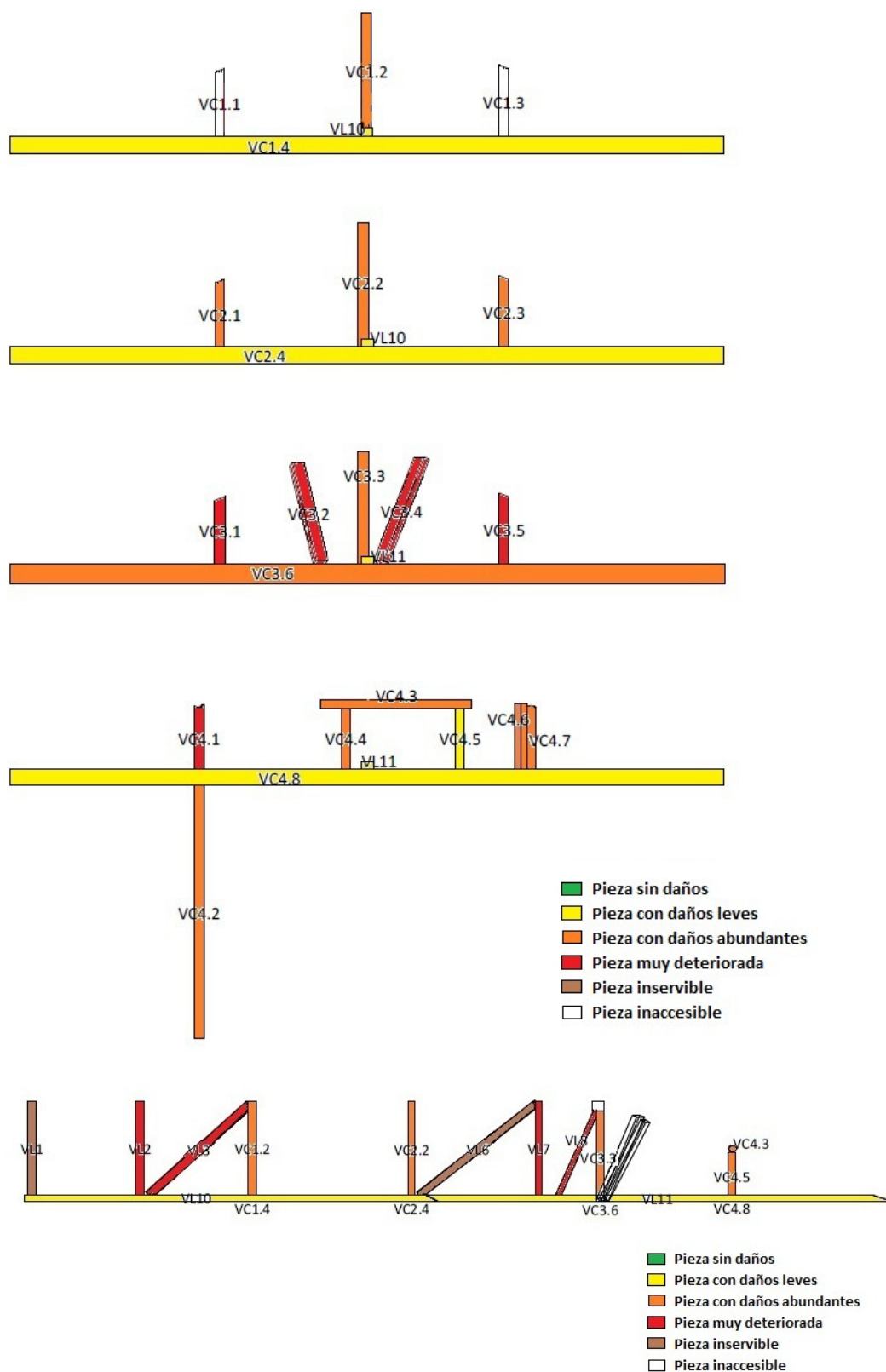
Los durmientes tampoco se han representado ya que en aquellos puntos donde eran accesibles y se podían observar se comprobó que estaban con un estado muy avanzado

de deterioro, hasta el punto de que en más de un 20% del total el durmiente no se podía identificar ya que sólo quedaba una masa de serrín.

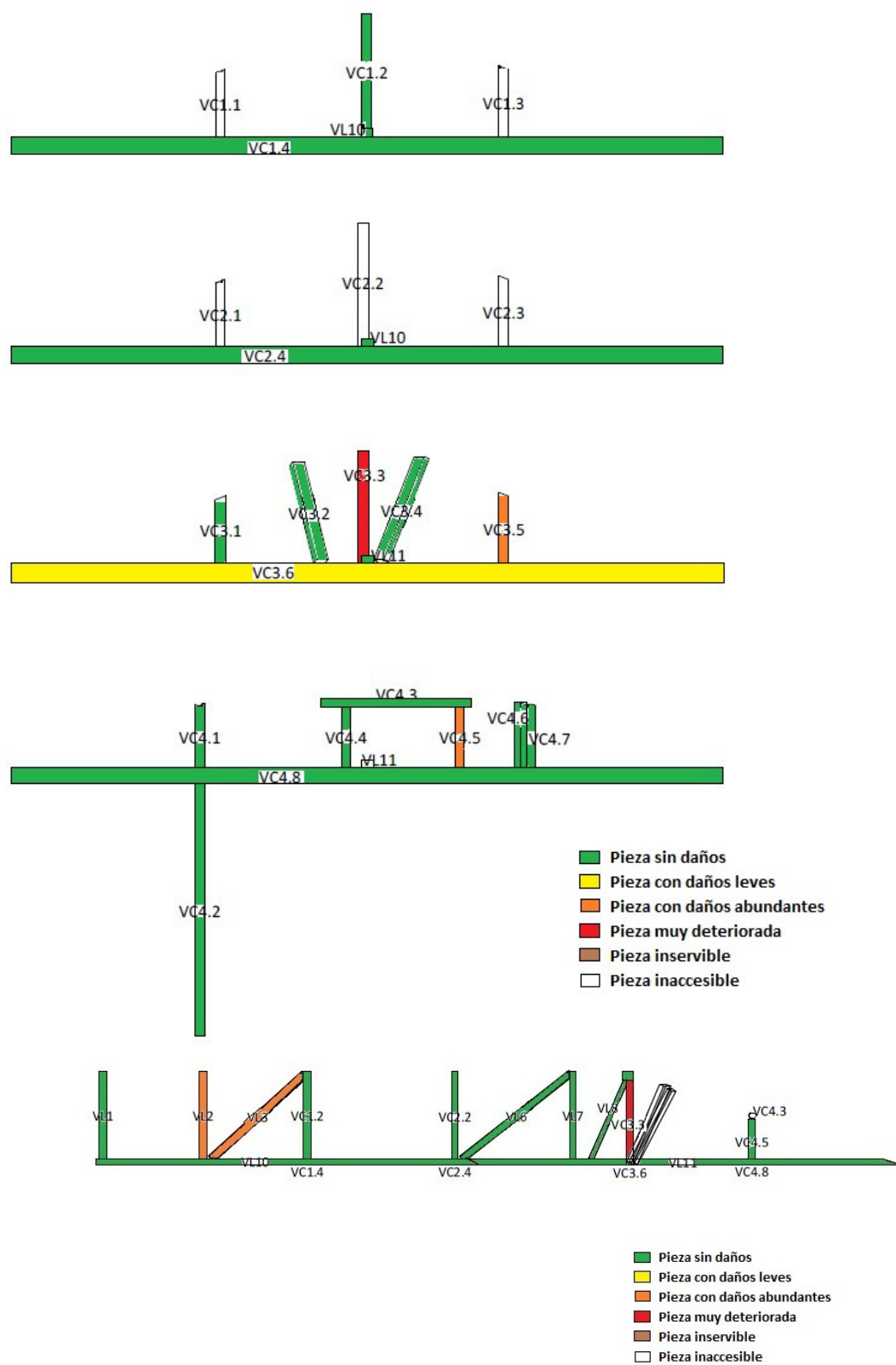
A continuación se muestran los croquis de la estructura con un código de color para los diferentes daños. Primero se mostrará los daños ocasionados por anóbidos, a continuación cerambícidos, después otros daños, para finalizar con un croquis con la integración de todos los daños.

La leyenda empleada ha sido la siguiente:

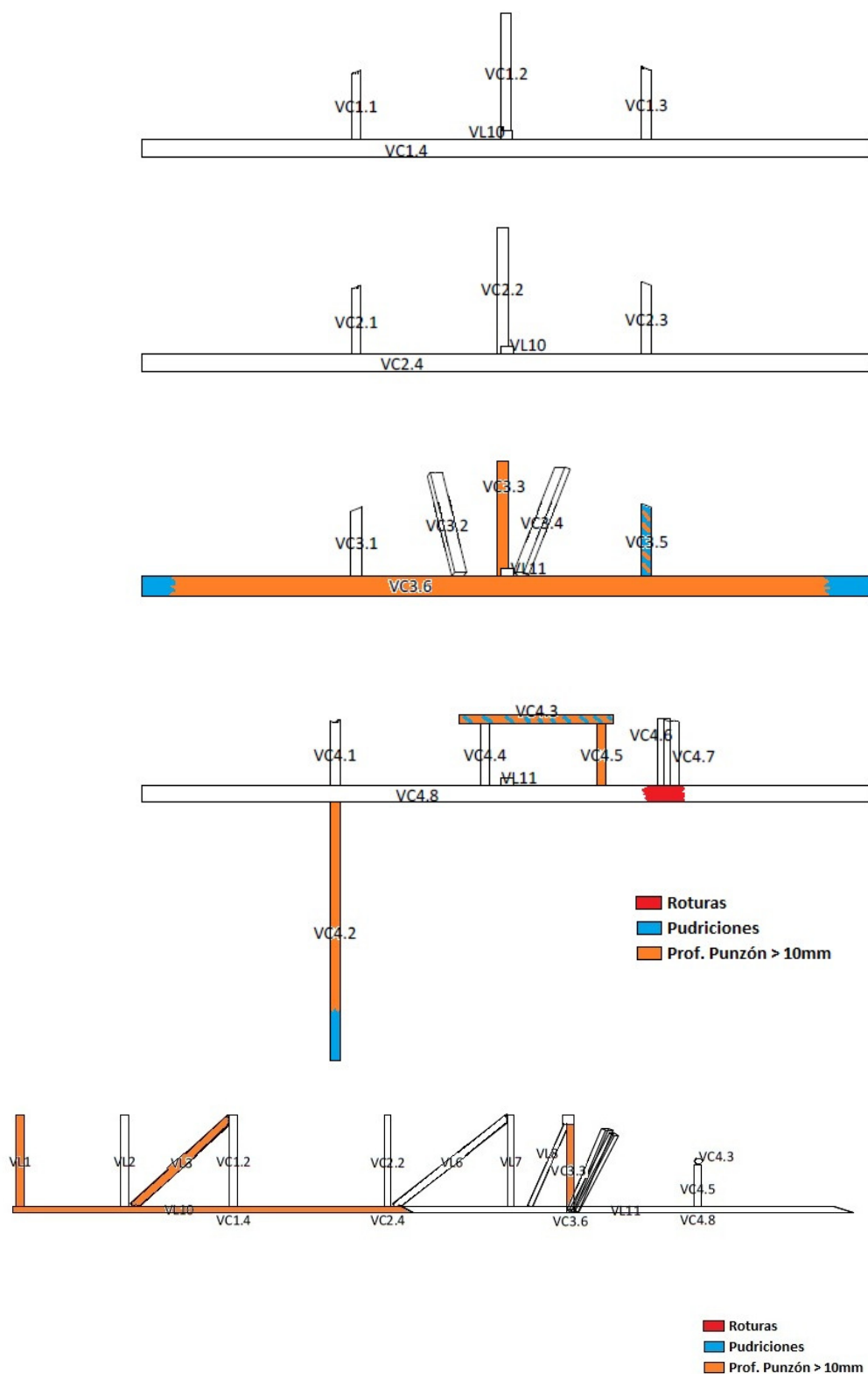
- Verde: para aquellas piezas que tras su inspección no presentaban ningún daño para el agente atacante examinado.
- Amarillo: para aquellas piezas con un ataque leve, que o bien el ataque no estaba extendido por toda la superficie de la pieza o bien éste es de una intensidad muy baja.
- Naranja: piezas que están atacadas en toda su superficie, pero el ataque no produce una pérdida de las propiedades originales de la madera significativa en un primer análisis visual y con punzón.
- Rojo: piezas atacadas en toda su superficie, cuando el ataque provoca que hay una merma o diferencia de comportamiento del material frente a un análisis visual y con punzón.
- Marrón: piezas con un alto ataque generalizado y que han perdido parte de su sección original.



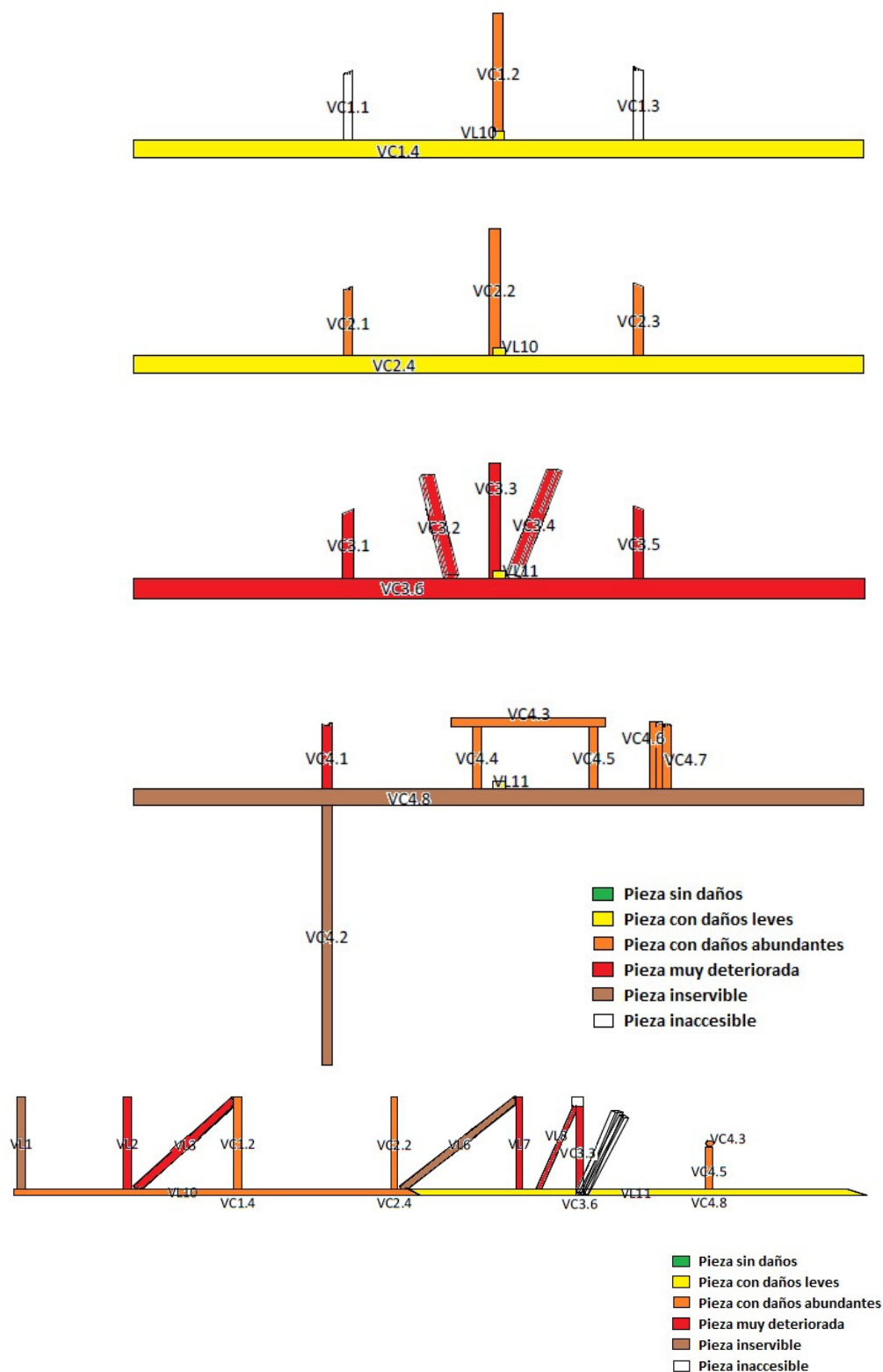
Anóbidos



Carcoma gruesa



Roturas y pudriciones



Análisis global de daños

7 TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS

Una vez realizada la inspección y la identificación de daños se procedió a emplear una serie de técnicas no destructivas con dos objetivos:

- Por una parte, se buscaba cuantificar los daños que estos ataques habían provocado.
- Por otra parte, mediante el empleo de estas técnicas se consigue estimar las propiedades del material. En este caso se busca valorar los resultados para aproximar una clase resistente y poder realizar las comprobaciones que exige el Código Técnico de la Edificación.

Se entiende por ensayo o técnica no destructiva (END o TND) cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas químicas o dimensionales. En base a esta definición y lo estricto que se sea al aplicarla se podría discutir sobre lo que es o no una alteración. Se considerará que el END implica un daño imperceptible o nulo en la muestra examinada.

Mediante el uso de TND se buscan dos objetivos, por una parte se trata de cuantificar los daños, sirviendo estas técnicas para evaluar en qué grado están las piezas afectadas por las diversas patologías, e incluso pudiendo detectar ataques en zonas que en un primer análisis no se podrían detectar; por otro lado se emplean para estimar las propiedades físicas y mecánicas del material.

Entre las diversas técnicas existentes se desestimó la clasificación visual por la gran acumulación de hollín y suciedad en las piezas lo que imposibilitaba poder hacer una evaluación y posterior clasificación de las mismas.

Las TND se pueden separar en varios grupos en función de los principios físicos en los que se basen, así tenemos:

- Métodos acústicos, se basan en la velocidad de propagación de la onda sonora.
- Métodos mecánicos, se basan en la dificultad a la penetración o extracción que presenta un material.

Con estas técnicas se buscó determinar las propiedades del material y cuantificar el grado de ataque al que están sometidas.

A continuación se detallan las TND empleadas.

Se emplearon como TND el resistógrafo, para comprobar el estado de conservación del eje de la noria y en determinados puntos para determinar si había o no pudrición. El uso del resistógrafo se empleó también de una manera experimental para comprobar que la información respecto a las especies de las vigas principales era correcta. Se observó que la resistencia obtenida en las lecturas por las vigas principales que eran de olmo, era del orden de 2 veces superior a la obtenida en las vigas de pino silvestre, lo cual coincide con lo que cabría esperar dada la diferencia de densidad de ambas especies.

También se emplearon el Pilodyn® y el Método de Arranque de Tornillo. Con estos métodos se buscó determinar la densidad de la madera y evaluar cual era el grado de ataque superficial, para poder realizar una modelización del estado actual de la estructura, considerando la sección útil, reduciendo en cada pieza la parte perimetral que esté dañada.

Como métodos acústicos se empleó el Microsecond Timer Fakopp, por su comodidad al no necesitar un pretaladro. Con este método lo que se busca es realizar una estimación del módulo de elasticidad mediante la relación de la velocidad de propagación de la onda sonora.

A continuación se describe en más detalle cada uno de los métodos empleados.

7.1 Resistógrafo

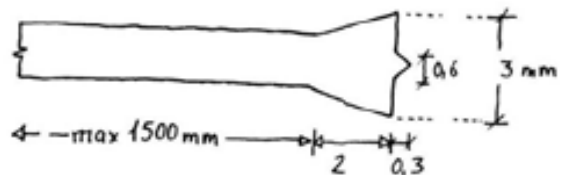
El resistógrafo es un equipo de TND que consiste en un taladro mecánico que realiza una perforación de 3 mm de diámetro, midiendo la resistencia que ofrece a la perforación. Este equipo se emplea en sentido radial, para así poder determinar la diferencia entre madera de primavera y de verano.



Fotografía del equipo empleado

El empleo de este equipo se remonta a 1985 en Alemania, donde se empleó para la determinación del estado de conservación y evaluar la degradación de postes (Rinn, 1996). Posteriormente evolucionó a un dispositivo diseñado por Rinn que se denominó “Densitomat” y en 1993 se renombró como resistógrafo.

El equipo es portátil y tiene una broca consistente en una aguja de acero de 1,5 mm de diámetro terminada en la punta perforadora que tiene una dimensión de 3 mm.



Detalle de la cabeza de la aguja del resistógrafo. (Arriaga F., et al. 2002 Intervención en estructuras de madera.)

La perforación se realiza a velocidad constante y lo que mide el equipo es la resistencia a la penetración mediante el consumo de potencia, obteniendo así una gráfica en la cual se puede observar la distinta cantidad de potencia y asociarlo a distinta densidad (más densidad mayor potencia). La salida de resultados se obtiene o bien en papel

termosensible o se almacena en la memoria interna del equipo para luego ser volcada al ordenador. Estas gráficas permiten detectar las pérdidas de densidad debidas a oquedades o pudriciones en zonas concretas, que se habían detectado previamente en la inspección visual inicial, como posibles puntos candidatos a sufrir una patología.

7.2 Métodos acústicos

Los métodos acústicos se llevan aplicando desde hace más de 50 años en el estudio y evaluación de las propiedades de algunos materiales, como es el caso del hormigón. Si bien para el caso de la madera no hay el mismo nivel de desarrollo tecnológico, sí que hay grupos de investigación muy importantes dedicados a su estudio.

El empleo de los ultrasonidos en la madera comenzó hacia los años 50 del siglo XX, en un principio estos métodos se empleaban para la clasificación del material. Fue en los años 70, cuando se empezó a analizar sus posibilidades en la inspección de estructuras existentes.

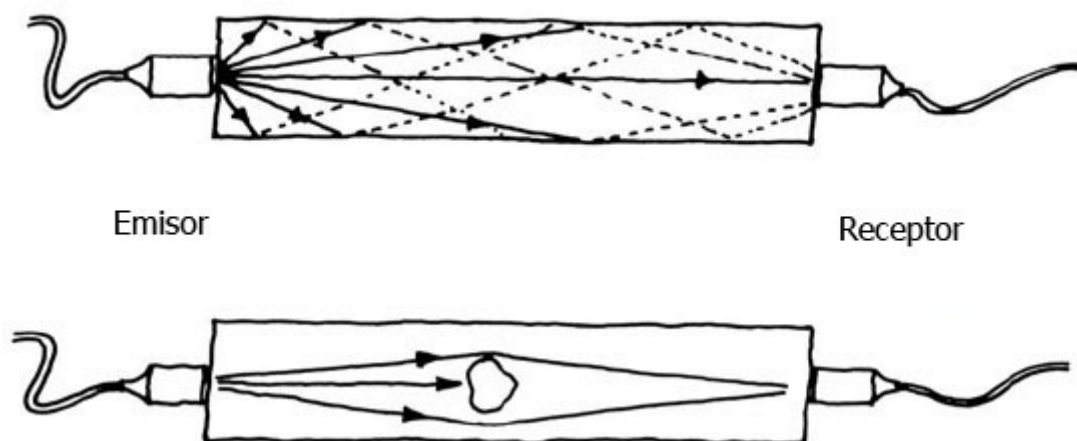
Es un método mediante el cual se mide el tiempo de propagación de la onda sonora y conociendo la distancia se calcula la velocidad de propagación y con ésta y la densidad se obtiene el MOE módulo de elasticidad dinámico ($E_{\text{din}} = \rho \cdot V^2$). Este método es adecuado para la verificación de materiales heterogéneos como la madera y el hormigón. Se emplean dos palpadores, uno actúa de emisor y el otro de receptor. Al emitirse las ondas, el equipo mide el tiempo transcurrido entre el emisor y el receptor.

La capacidad o sensibilidad de los métodos acústicos para detectar las singularidades en el material dependen de la longitud de onda de la señal propagada y de las dimensiones de la singularidad a detectar. En general, el tamaño del defecto a detectar debe ser igual o superior a la longitud de onda para que pueda ser detectado.

La onda sonora se propaga con mayor velocidad cuanto mayor sea la densidad, y si hay alguna discontinuidad en el material, como una grieta, un nudo o una pudrición tendrán como resultado un aumento en el tiempo transcurrido hasta llegar al receptor, ya que se produce un aumento de la distancia de las ondas sónicas al tener que sortear el obstáculo.

La presión sonora es máxima para la dirección axial del palpador y disminuye para las oblicuas conforme se aumenta el ángulo con el que inciden los palpadores en el material.

En la velocidad de propagación de la onda influyen diversos factores además de la densidad y del módulo de elasticidad de la madera como el contenido de humedad, la temperatura y el nivel de tensión.



Detalle del modo de propagación de las ondas en el material. (Arriaga F., et al. 2002 Intervención en estructuras de madera.)

Se estima que el contenido de humedad, aparte de influir en las propiedades físicas y mecánicas del material, influye en la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas en la madera, generando por cada incremento del 1% de humedad una disminución en la velocidad de un 0,8%, siguiendo una relación lineal en el intervalo comprendido entre el 5 y el 30%. (Sandoz, 1989).

En este tipo de ensayos es importante también tener en cuenta la atenuación de la señal acústica. En la propagación de la señal acústica se produce una atenuación en los diversos materiales, que es mayor cuanto mayor es su frecuencia y menor su longitud de onda. Teniendo esto en cuenta, se deduce que el uso de frecuencias baja (grandes longitudes de onda) permite barrer mayores longitudes, ya que se produce una menor absorción, pero esto hace que la discontinuidad deba ser mayor, con lo que se reduce la sensibilidad del método.

Mediante esta técnica, aparte de calcular el MOE, se pueden detectar discontinuidades en el material como nudos o fendas, ya que éstos tienen un efecto en las medidas de aumentar el tiempo transcurrido hasta llegar la onda al receptor. Este fenómeno es debido a que el camino recorrido por las ondas es mayor al tener que sortear el obstáculo, como puede observarse en la figura.

La metodología empleada ha sido la realización de lecturas en cada una de las piezas colocando los palpadores en una posición oblicua, introduciendo estos en un ángulo menor de 45º y posteriormente midiendo la distancia entre los puntos de inserción de los

palpadores y el ancho de la pieza para obtener la distancia que los separa. Se realizaban 4 lecturas y se obtenía la media.

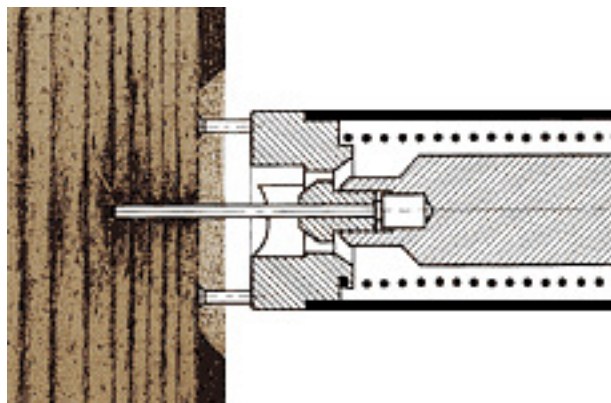


Equipo Fakopp Microsecond Timer

El equipo empleado en esta TND ha sido el Fakopp Microsecond Timer por su rapidez y comodidad ya que no requiere la realización previa de un pretaladro ni la aplicación de ningún material de acoplamiento. Esto es así gracias al diseño de los palpadores que hace posible su utilización mediante el clavado directo en el material.

7.3 Pilodyn

El pilodyn® es un equipo que permite estimar la densidad superficial de la madera mediante un impacto producido por una barra circular de 2 mm de diámetro. Esta barra es accionada por un muelle dinamométrico, es decir, que desarrolla una energía controlada, lo que produce que la barra impacte sobre la madera siempre con la misma energía, penetrando en la madera.



Detalle del funcionamiento del Pilodyn® (esquema obtenido de <http://korins.com/m/pro/pilodyn6J.html>).

Dispone de una escala calibrada donde poder realizar una lectura en milímetros de la profundidad de penetración, y así relacionar profundidad con densidad. Cuanta más densidad tenga la pieza de madera menos penetrará la barra.

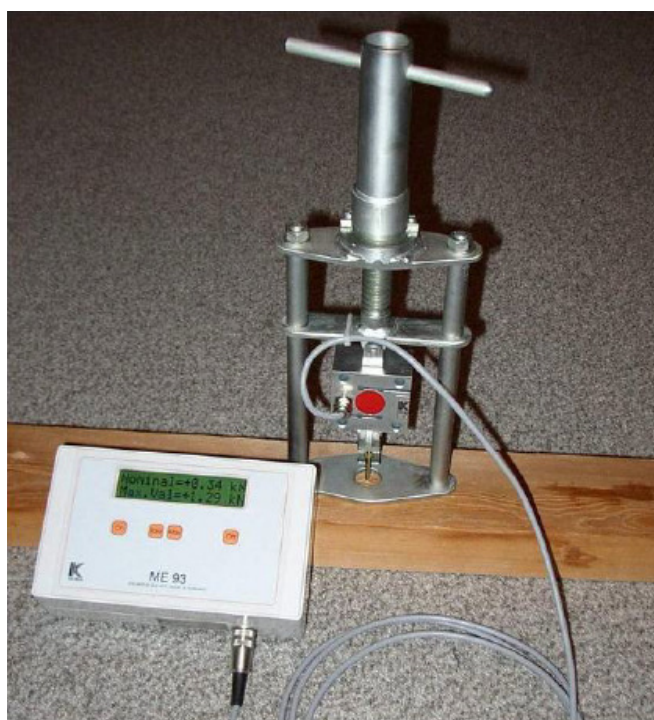
Las mediciones con este equipo presentan la ventaja de ser muy rápidas y el equipo es muy manejable y ligero lo cual es una ventaja a la hora de moverse por la estructura.

Los datos obtenidos con este equipo se complementan con los obtenidos con mediante el Método de Arranque de Tornillo (MAT)

7.4 Método de arranque de tornillo

Esta TND consiste en estimar la densidad de la madera en función de la resistencia que ofrece a la extracción de un tornillo mediante el arranque del mismo

El ensayo se realiza atornillando 2 centímetros un tornillo de modo que esté perpendicular a la superficie y posteriormente se extrae con el equipo que dará lectura de la fuerza necesaria para la extracción mediante una célula de carga. El equipo empleado es Screw Withdrawal Meter (MAT) (Fakopp®, Sopron, Hungría).



Equipo empleado en el método de arranque de tornillo.

La lectura se obtiene mediante una célula de carga que mide la fuerza empleada en la extracción del tornillo, y mediante la relación de la profundidad del tirafondo, el tamaño y la fuerza empleada podemos obtener un valor estimado de la densidad.

7.5 Xilohigrómetro

Como ya se ha explicado la humedad influye en las propiedades de la madera y esto hace que sea necesario el conocimiento del contenido de humedad en la madera para poder determinar sus propiedades y realizar los END con garantías. Para ello se empleó un xilohigrómetro de resistencia eléctrica.



Xilohigrómetro de resistencia eléctrica empleado para determinar el contenido de humedad.

Este equipo funciona clavando dos puntas en la madera de la cual se quiere conocer el contenido de humedad. En el equipo se introducen los datos de la especie, de la temperatura y de la humedad del medio, y el equipo emite una señal eléctrica. El equipo mide la resistencia eléctrica ofrecida por el material, y como la distancia es fija, y la especie conocida determina así el contenido de humedad de la madera.

8 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LA MADERA ESTRUCTURAL

8.1 Determinación de la especie

La determinación de la especie se ha realizado en función de la información aportada por la propiedad, que informó de que todo era pino silvestre procedente de los pinares de Navafría, salvo dos de las vigas principales que eran de álamo negro, nombre con el que en la zona se conoce al olmo. Esta información se contrastó con el análisis visual y se confirmó en algunas piezas al quedar restos de su corteza papirácea. En las muestras que se obtuvieron de madera, el color que presentaba coincidía con el blanco amarillento que tiene la albura de pino silvestre, y en algunas zonas donde se pudo muestrear duramen presentaba un color rojizo. Además cabe señalar el origen de la construcción y la época de su construcción, este edificio se construyó en los años 40 del siglo pasado y se realizó con los medios de la época, cuando no había tanta facilidad en el transporte, además que, dado el entorno, no había necesidad de traer la madera de otros lugares más lejanos dada la buena calidad de los pinos de la zona. En la modelización, se ha estimado oportuno simplificar y considerar todas las piezas como si fueran pino silvestre, incluidas las dos vigas de olmo. Esta simplificación se ha realizado ya que está del lado de la seguridad al comprobar los valores para la resistencia que se dan en el libro *Especies de maderas para construcción, carpintería y mobiliario* (Peraza F. et al. 2004) como se puede ver a continuación.

Propiedad	Pino silvestre	Olmo
Flexión estática	90-110 N/mm ²	72-112 N/mm ²
Modulo de elasticidad	8600-10000 N/mm ²	10800 N/mm ²
Compresión axial	42-47 N/mm ²	41-55 N/mm ²
Compresión perpendicular	9,2 N/mm ²	10,6 N/mm ²
Cortante	10-11 N/mm ²	6,8 N/mm ²
Flexión dinámica	2,25 J/cm ²	5,9 J/cm ²

Peraza F. et al. 2004

Como se puede observar, si bien el olmo presenta un margen más amplio en cuanto a resistencia a flexión estática, el valor medio sigue estando comprendido entre los valores que alcanza el pino silvestre. En el resto de casos iguala valores o incluso los supera, salvo en el cortante, pero a pesar de esto se ha decidido aplicar esta simplificación dada la situación de las piezas y sus dimensiones.

8.2 Técnicas no destructivas. Asignación de la clase resistente

Para la estimación de la clase resistente, se han empleado las diferentes TND anteriormente detalladas, es decir, Pilodyn®, Método de Arranque de Tornillo, y Métodos acústicos. Al presentar la estructura tan alto grado de deterioro debido a los ataques de carcoma y pudriciones ha sido complicado el análisis de datos tratando de realizar el muestreo en las zonas menos dañadas para así poder realizar una aproximación a la clase resistente de la madera original. Una vez realizado la toma de datos con los diferentes ensayos no destructivos se realizó un análisis detallado de los datos obtenidos para determinar una clase resistente. Este proceso se realizó con cada uno de los equipos, buscando obtener con los datos obtenidos de Pilodyn® y Método de Arranque de Tornillo valores de densidad y con Fakopp valores del módulo de elasticidad.

La clase resistente es el sistema de clasificación al que se recurre según el Documento Básico de seguridad estructural-Madera para reducir y evitar una excesiva complejidad en la clasificación de especies y calidades, reuniendo en un número limitado de grupos de forma conjunta especies-calidades con propiedades similares. El sistema está basado en el procedimiento de asignar clase resistente, mediante una norma de clasificación por calidades, a una especie arbórea de procedencia conocida y de la cual se han determinado previamente sus propiedades mecánicas de acuerdo con ensayos normalizados. La norma de clasificación por calidades, de especies y procedencias, que asigna clase resistente es competencia, normalmente, del organismo de normalización del país que publica la norma. Ésta garantiza que los valores de las propiedades, de la madera aserrada así clasificada, son mayores o iguales a los que corresponden para la clase resistente asignada. De este modo se tienen los valores para las propiedades de cada clase resistente. Estos valores se pueden encontrar en el anejo E del Código Técnico Seguridad Estructural-Madera.

Mediante los END que se han empleado, lo que se ha buscado ha sido el obtener unos valores de densidad, mediante los datos obtenidos con Pilodyn® y MAT, y unos valores de módulo de elasticidad dinámico y módulo de elasticidad estático mediante los resultados obtenidos con el END de Fakopp. Las ecuaciones que han permitido relacionar los datos obtenidos con los END con las propiedades del material se han obtenido de la tesis doctoral realizada en 2007 por Guillermo Íñiguez en la E.T.S.I. de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, “Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural”.

8.2.1 Pilodyn

Con el Pilodyn® se busca estimar un valor aproximado de la densidad. Mediante este equipo, se realiza la medición de la profundidad de penetración de una varilla de acero de 2 mm de diámetro lanzada mediante un muelle dinamométrico, que realiza siempre la misma presión, de modo que se puede relacionar la profundidad de penetración con la densidad mediante la siguiente fórmula obtenida de la tesis doctoral de Guillermo Íñiguez:

$$\text{Den}_{\text{loc}} = 771,91 - 19,03 \cdot \text{Prof}_{\text{med}} - 97,01 \cdot Z_{\text{rad}} - 63,19 \cdot Z_{\text{sil}} \quad R^2: 0,59$$

Donde:

Den_{loc} : es la densidad de la pieza al 12% de humedad en kg/m^3 .

Prof_{med} : es la profundidad de penetración en mm (media aritmética de la lectura radial y tangencial).

Z_{rad} : es igual a 1 si la especie es pino radiata, si no es 0.

Z_{sil} : es igual a 1 si la especie es pino silvestre, si no es 0.

Para el caso de rollizos, también se empleó la fórmula más específica que concreta si la lectura es radial o tangencial y se empleó la opción de radial:

$$\text{Den}_{\text{loc}} = 728,05 - 14,34 \cdot \text{Prof}_{\text{rad}} - 95,79 \cdot Z_{\text{rad}} - 68,19 \cdot Z_{\text{sil}} \quad R^2: 0,53$$

Donde:

Den_{loc} : es la densidad de la pieza al 12% de humedad en kg/m^3 .

Prof_{rad} : es la profundidad de penetración en mm según la dirección radial.

Z_{rad} : es igual a 1 si la especie es pino radiata, si no es 0. En nuestro caso toma el valor de 0.

Z_{sil} : es igual a 1 si la especie es pino silvestre, si no es 0. En nuestro caso toma el valor de 1.

Con este equipo la metodología empleada consistió en realizar tres lecturas a lo largo de la pieza y obtener un valor medio.

El procedimiento de ensayo seguido fue el siguiente, lo primero que se hace es cargar el muelle mediante la ayuda de una baqueta hasta que la varilla queda fijada mediante el resorte que la liberará mediante el gatillo o disparador. Una vez cargado el equipo, se coloca en una posición perpendicular a la superficie de la madera y se sujeta firmemente sobre la zona a inspeccionar. Después se efectúa una ligera presión sobre la culata del equipo, que hace de disparador, y el muelle se suelta haciendo que la varilla penetre en la madera con una energía fija. Mediante una escala métrica se puede realizar la lectura de la profundidad que ha penetrado la aguja en la madera.

La realización de estas tres lecturas sirvió también para comprobar el estado de la pieza, ya que había casos en los que dos de las lecturas daban un valor en torno a 9 mm y la tercera lectura se disparaba a 20 mm, lo cual indicaba que ahí presentaba una patología. En ese caso la media para determinar la densidad de la madera y asignar una clase resistente de las lecturas obtenidas con el Pilodyn® se realizaba sólo con las 2 lecturas más homogéneas y se desestimaba la tercera lectura. Esta lectura de un valor más elevado sí que se ha tenido en cuenta en el momento de modelizar la estructura en el estado actual y ese ha sido el valor a descontar del perímetro por considerarlo el más desfavorable.

8.2.2 Método Arranque de Tornillo

Este método es complementación del Pilodyn® y se emplea por su mayor precisión. Conjuntamente ambos métodos se complementan muy bien ya que a pesar de que el Pilodyn® posee unos valores estadísticos de R^2 más bajos que el MAT es mucho más cómodo de usar, por su ligereza y la simplicidad del método de ensayo. En los ensayos realizados con MAT se emplearon los siguientes modelos matemáticos para relacionar los valores de fuerza de extracción obtenidos mediante MAT con la densidad estimada (obtenidos de la tesis de Guillermo Íñiguez).

$$\text{Den}_{\text{loc}} = 365,88 + 95,46 \cdot \text{Mat}_{\text{med}} - 81,47 \cdot Z_{\text{rad}} - 38,53 \cdot Z_{\text{sil}} \quad R^2: 0,59$$

Donde:

Den_{loc} : es la densidad de la rebanada al 12% de humedad en kg/m^3 .

Mat_{med} : es la fuerza de extracción en kN (media aritmética de la lectura radial y tangencial).

Z_{rad} : es igual a 1 si la especie es pino radiata, si no es 0. En nuestro caso toma el valor de 0.

Z_{sil} : es igual a 1 si la especie es pino silvestre, si no es 0. En nuestro caso toma el valor de 1.

También se empleó la fórmula siguiente para el caso de rollizos:

$$\text{Den}_{\text{loc}} = 397,75 + 82,86 \cdot \text{Mat}_{\text{rad}} - 93,95 \cdot Z_{\text{rad}} - 46,47 \cdot Z_{\text{sil}} \quad R^2: 0,60$$

Donde:

Den_{loc} : es la densidad de la rebanada al 12% de humedad en kg/m^3 .

Mat_{rad} : es la fuerza de extracción en kN medida según la dirección radial.

Z_{rad} : es igual a 1 si la especie es pino radiata, si no es 0. En nuestro caso toma el valor de 0.

Z_{sil} : es igual a 1 si la especie es pino silvestre, si no es 0. En nuestro caso toma el valor de 1.

La metodología empleada consistió en atornillar un tirafondo de 4 mm de diámetro y 70 mm de longitud, en la zona elegida, insertándolo hasta una profundidad de 20 mm. Esto se realizó mediante un atornillador eléctrico y la ayuda de un taco de madera de 50 mm que sirvió como tope y referencia para controlar el que los tirafondos no se introdujesen más.

Primeramente se realizó la colocación de todos los tirafondos en todas las piezas a estudiar, por motivos de sistematizar el trabajo. De este modo se trabajó primero con el atornillador eléctrico y después se procedió a emplear el equipo portátil MAT (máquina de arranque de tornillo) de modo sistemático tomando los datos en los estadillos preparados a tal efecto. Se obtuvieron medidas relativamente bajas en un principio y se optó por realizar otros ensayos introduciendo los tirafondos 30 mm, para posteriormente establecer una regresión en el laboratorio que relacionase las lecturas de 20 mm con las de 30 mm. Esta regresión se realizó sobre 11 muestras en madera sana y no presentaba un R^2 aceptable por lo que se desestimó, tomando finalmente los datos obtenidos en un principio de las lecturas obtenidas mediante los tirafondos que fueron introducidos 20 mm.

8.2.3 Método de ultrasonidos

Para la evaluación de los datos obtenidos mediante Fakopp Microsecond Timer, se han empleado las fórmulas obtenidas de la tesis doctoral realizada en 2007 por Guillermo Íñiguez en la E.T.S.I. de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid, “Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural”.

Se han empleado las fórmulas estimadas para el equipo de ultrasonido Sylvatest Duo, en vez de las de onda de presión de Fakopp. Esta simplificación se ha realizado ya que las TND suelen dar valores más elevados de clase resistente y mediante esta simplificación se está del lado de la seguridad. Esto es así debido a que Fakopp emplea la onda sonora para determinar la velocidad de propagación mientras que Sylvatest emplea los ultrasonidos. Esta diferencia ocasiona que al ser la frecuencia de ultrasonidos superior a la de Fakopp, la velocidad sea algo menor en Fakopp lo cual nos dará unos valores de módulo de elasticidad algo menores, por lo que al determinar la clase resistente también será algo menor, lo cual está del lado de la seguridad.

La fórmula empleada fue la siguiente:

$$E_{glo} = -9420,57 + 4,1919 \cdot Vel_{TT} - 2109,64 \cdot Z_{rad} - 1113,86 \cdot Z_{sil} \quad R^2: 0,53$$

Donde:

E_{glo} : es el módulo de elasticidad global en N/mm^2 al 12% de humedad.

Vel_{TT} : es la velocidad media de ultrasonidos en m/s de la lectura directa testa-testa corregida al 12% de contenido de humedad.

Z_{rad} : es igual a 1 si la especie es pino radiata, sino es 0.

Z_{sil} : es igual a 1 si la especie es pino silvestre, sino es 0.

Mediante los datos obtenidos con Fakopp también se determinó la tensión de rotura a flexión mediante la siguiente fórmula:

$$T_{\text{rot}} = - 48,52 + 0,0190 \cdot \text{Vel}_{\text{TT}} - 18,20 \cdot Z_{\text{rad}} - 7,27 \cdot Z_{\text{sil}} \quad R^2:0,50$$

T_{rot} : es el valor de la tensión de rotura a flexión en N/mm^2 .

Vel_{TT} : es la velocidad media de ultrasonidos en m/s de la lectura directa testa-testa corregida al 12% de contenido de humedad.

Z_{rad} : es igual a 1 si la especie es pino radiata, sino es 0.

Z_{sil} : es igual a 1 si la especie es pino silvestre, sino es 0.

8.3 Conclusiones de TND

Mediante los END que se han empleado, lo que se ha buscado ha sido el obtener unos valores de densidad, mediante los datos obtenidos con Pilodyn® y MAT y unos valores de módulo de elasticidad dinámico y módulo de elasticidad estático mediante los resultados obtenidos con el END de Fakopp. Para ello se han clasificado las medidas en función de los tipos de piezas que podemos encontrar en la estructura.

Esta clasificación es un tanto artificial dada la complejidad de la estructura y el hecho de no ser una estructura con una tipología que se repita uniformemente, de modo que se ha clasificado en 4 grupos atendiendo a un criterio de homogeneidad en tamaño y misma especie.

Estos 4 grupos son el 11 viga principal de pino, el 12 viga principal de olmo, el 13 enanos y diagonales y el 14 que engloba las vigas longitudinales, correas, lima, par y el pilar.

Los datos obtenidos de estos grupos se han tratado mediante el programa estadístico Statgraphics obteniendo un valor medio y una desviación estándar.

TIPO	ρ media						E medio			R media	
	PILODYN			MAT			Nº	E medio	CV	R media	CV
	Nº	ρ media	CV	Nº	ρ media	CV					
11	2	490	31,6	2	417	34,2	1	10675	2057,3	40,34	9,3
12	1	461	44,6	-	-	-	-	-	-	-	-
13	18	479	10,5	10	398	15,3	9	7227	685,7	24,72	3,1
14	10	494	14,1	2	403	34,2	2	11714	1454,7	45,05	6,6
Total	31	484	-	14	402	-	12	8262	-	29,41	-

Donde:

- Nº: hace referencia al número de valores tenidos en cuenta.
- Tipo: indica el grupo estructural al que corresponde según el criterio antes expuesto.
- ρ media: valor de densidad medio estimado expresado en kg/m^3 .
- E medio: Valor de módulo de elasticidad medio expresado en N/mm^2 .
- R media: corresponde con la tensión de rotura N/mm^2 .

Con estos valores y mediante la tabla E.1 del Documento Básico SE-M Madera se ha obtenido que según los valores de densidad media obtenidos mediante Pilodyn® se podría asignar una clase resistente C35, mediante la densidad obtenida con arranque de tornillo la clase resistente estimada es de una C20, mediante el módulo de elasticidad medio una C16.

Al grupo 12 no se ha asignado una clase resistente debido a que al ser frondosas y haberse obtenido un valor más bajo de densidad que el que presenta la norma, queda fuera de la clasificación, y para el cálculo se estimará como si fuera conífera. Además esta aproximación se realiza basándose en la comparativa, explicada previamente, en la cual se refleja que las propiedades del olmo, son al menos iguales que las del pino silvestre.

Grupo de piezas	Parámetro estimado	Clase resistente asignada
11	Densidad Pilodyn®	C35
	Densidad MAT	C22
	Módulo de elasticidad medio	C22
13	Densidad Pilodyn®	C30
	Densidad MAT	C20
	Módulo de elasticidad medio	C14
14	Densidad Pilodyn®	C35
	Densidad MAT	C20
	Módulo de elasticidad medio	C27
Medio	Densidad Pilodyn®	C35
	Densidad MAT	C20
	Módulo de elasticidad medio	C16
	Tensión de rotura	C18

9 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA DE MADERA

9.1 Bases de cálculo

Mediante los análisis realizados se ha podido estimar la clase resistente empleada en la construcción de la cubierta del Martinete de Navafría. Según las diferentes técnicas empleadas se han obtenido diferentes valores y en el cálculo, al final, se ha decidido emplear un valor de clase resistente de C14. Se ha elegido esta clase resistente por ser el mínimo valor obtenido y por estar del lado de la seguridad. Seguramente estos resultados de una clase resistente tan baja sean debidos al mal estado de conservación y que en un origen fuese una clase resistente al menos C16, pero se ha decidido emplear una clase C14 en el cálculo por estar del lado de la seguridad y por obtener unos valores del estado actual.

Las acciones estimadas para el cálculo se han obtenido según la normativa aplicable basándose en los documentos del Código Técnico de la Edificación, en Documento Básico SE-AE Seguridad Estructural Acciones en la edificación y en Documento Básico SE-M Seguridad Estructural Madera. De estos documentos también se han obtenido las diversas hipótesis de carga, así como las diferentes combinaciones entre ellas realizables.

9.2 Acciones consideradas en el cálculo

De las posibles acciones que afectan a una estructura se van a considerar las debidas a acciones gravitatorias y las acciones debidas al viento, no se tendrán en cuenta las acciones térmicas, reológicas, sísmicas y del terreno.

Las cargas estimadas se han obtenido a partir de la normativa vigente CTE SE-Acciones y después de la realización de un análisis de la cubierta, con todo esto se tiene:

Acciones gravitatorias: son aquellas que se producen por el efecto de la gravedad, por lo que son cargas con una componente vertical. Dentro de estas encontramos: peso propio, carga permanente, la sobre carga de uso y la sobrecarga de nieve.

- Peso propio: hace referencia al peso del elemento resistente, esta acción correspondería al valor de multiplicar el volumen del elemento por su peso específico aparente. En este caso los cálculos se realizarán mediante el programa Estrumad que calcula él mismo el peso propio de la estructura facilitando esta labor.
- Carga permanente: correspondiente a la carga que genera la cubierta. Se tiene que tener en cuenta todas las cargas debidas a los pesos de todos los elementos constructivos que gravitan permanentemente sobre los elementos resistentes. Se considerará como peso de la cubierta el debido a una capa de cemento de un espesor medio de 3 cm y el debido a teja árabe:

Teja árabe → 0,4 kN/m².

Mortero 3 cm → 0,3 kN/m².

Ripia de 2 cm de espesor → 0,12 kN/m².

Un total de 0,82 kN/m².

A lo que hay que añadir el peso de los pares en el modelo de la estructura completa, ya que no se han modelizado por facilitar el cálculo. Considerando el tamaño medio del par, el de un rollizo de 10 cm de diámetro y una longitud de 5,3 m con una densidad media de 6 kN/m³ tenemos un valor de unos 0,24 kN/m para cada par, lo que supone una carga lineal de 0,047 kN/m.

Estando los pares separados una distancia media de 50 cm tenemos que el valor por metro cuadrado es de: $0,094 \text{ kN/m}^2$ para cada una de las aguas de la cubierta.

Lo que supone una carga permanente por metro cuadrado de:

$$0,82 + 0,094 = 0,914 \text{ kN/m}^2.$$

En el modelo que representa el comportamiento de los pares, al estar estos representados e incluir el software el peso propio de la estructura este valor no lo consideraremos.

Sobre carga de uso: es la carga debida al peso de todos los objetos que puedan gravitar por el uso, tales como personas o muebles. En este caso la carga de uso aplicada es obtenida a partir de la tabla 3.1 del Documento Básico SE-AE Acciones en la edificación, correspondiente a una carga de una cubierta sólo accesible para mantenimiento $G \rightarrow G1 \rightarrow 2$ opciones: $0,4 \text{ kN/m}^2$ ---ó--- 1 kN no concomitante.

Carga de nieve: es la carga correspondiente al peso de la nieve sobre la superficie de la cubierta:

$$Q = \mu \cdot S_k$$

$$\mu = 1$$

$$S_k = \text{zona 3, } 1200\text{m} \rightarrow 1,1 \text{ kN/m}^2$$

Acciones debidas al viento: La acción de viento, según el Documento Básico de Seguridad Estructural Acciones en la Edificación es en general una fuerza perpendicular a la superficie de cada punto expuesto, o presión estática, q_e puede expresarse como:

$$q_e = q_b \cdot C_e \cdot C_p$$

Siendo:

- q_b la presión dinámica del viento. De forma simplificada, como valor en cualquier punto del territorio español, puede adoptarse $0,5 \text{ kN/m}^2$. Pueden obtenerse valores más precisos mediante el anejo D, en función del emplazamiento geográfico de la obra del DBSE-AE.
- c_e el coeficiente de exposición, variable con la altura del punto considerado, en función del grado de aspereza del entorno donde se encuentra ubicada la construcción. Se determina de acuerdo con lo establecido en 3.3.3. del DBSE-AE.
- c_p el coeficiente eólico o de presión, dependiente de la forma y orientación de la superficie respecto al viento, y en su caso, de la situación del punto respecto a los bordes de esa superficie; un valor negativo indica succión. Su valor se establece en 3.3.4 y 3.3.5. del DBSE-AE.

Para este caso en particular y de acuerdo con las tablas del DB- SE-AE tomamos unos valores de:

$$q_b = \text{zona A } 0,42 \text{ kN/m}^2 \text{ ó } 0,5 \text{ kN/m}^2.$$

$$c_e = \text{tabla 3.3.3 zona forestal IV} = 6\text{m de } h \rightarrow 1,4 \text{ ó } 3\text{m de } h \rightarrow 1,3$$

$$c_p = \text{esbeltez} < 1 \text{ huecos } 1,2 \text{ m}^2 \text{ sobre todos los huecos: } 0,5 + 0,5 + 1,2 \rightarrow \text{coef presión} = 0,1 - 0,0$$

9.3 Duración de las cargas

La duración de la carga influye directamente en la resistencia de la madera. Cuanto mayor es la duración menor es la resistencia. Las acciones que solicitan al elemento considerado deben asignarse a una de las clases de duración de la carga establecidas en la tabla 2.2. del Documento Básico de Seguridad estructural-Madera (DBSE-M).

Clase de duración	Duración aproximada acumulada de la acción en valor característico	Acción
Permanente	Más de 10 años	Permanente, peso propio
Larga	De 6 meses a 10 años	Apeos o estructuras provisionales no itinerantes
Media	De una semana a 6 meses	Sobrecarga de uso; nieve en localidades de >1000 m
Corta	Menos de una semana	Viento; nieve en localidades de < 1000 m
Instantánea	Algunos segundos	Sismo

Tabla 2.2. del Documento Básico de Seguridad estructural-Madera(DBSE-M)

Una vez realizada la asignación de la duración de las cargas tenemos para este caso particular que:

- El peso propio y la carga permanente tienen una duración Permanente.
- La sobre carga de nieve tendrá una duración Media.
- La sobrecarga de uso tendrá una duración Corta.
- El viento tendrá una duración corta.

9.4 Clases de servicio

El contenido de humedad de la madera es muy importante ya que la humedad de la madera influye significativamente en las propiedades mecánicas y debe tenerse en cuenta en el cálculo. Para ello, según el DBSE-M se asigna unas clases de servicio en función de cuales sean los contenidos de Humedad a los que estén sometidos:

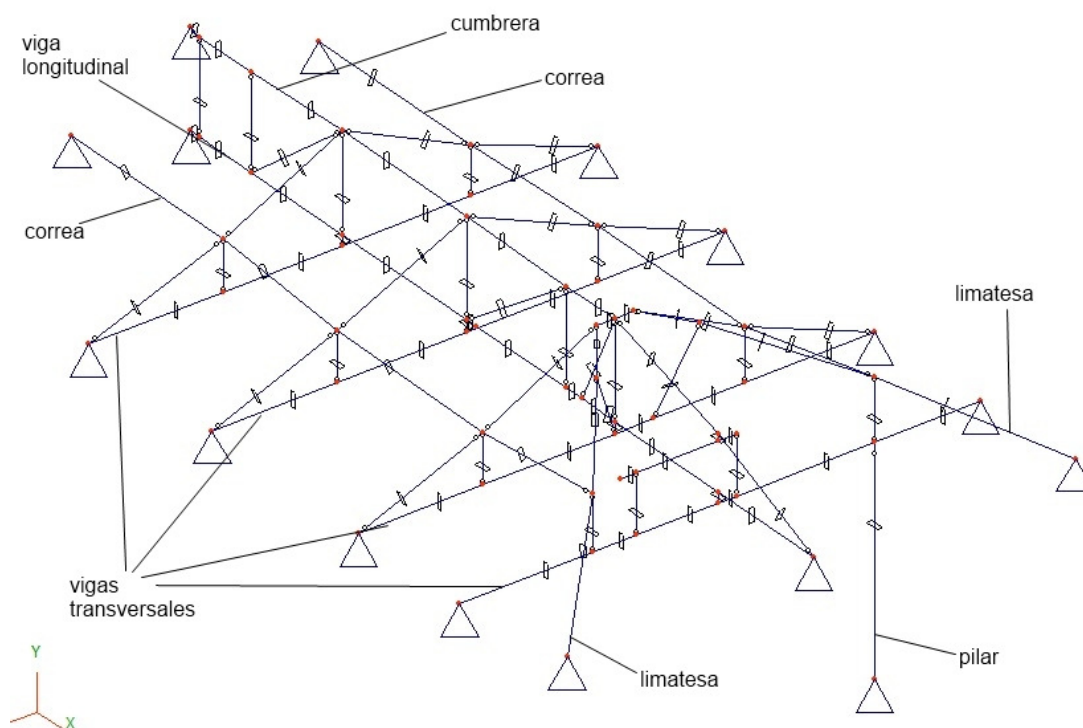
- Clase de servicio 1: Se caracteriza por un contenido de humedad en los materiales correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 65 % unas pocas semanas al año. El contenido de humedad medio de equilibrio higroscópico de la madera no excede el 12%. Las estructuras bajo cubierta y cerradas, generalmente pertenecen a esta clase de servicio.
- Clase de servicio 2: Se caracteriza por un contenido de humedad en los materiales correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 85% unas pocas semanas al año. El contenido de humedad medio de equilibrio higroscópico de la madera no excede el 20%. La estructura de una cubierta que se encuentre ventilada y en climas húmedos puede asignarse a esta clase de servicio.
- Clase de servicio 3: Condiciones climáticas que conduzcan a contenidos de humedad superiores al de la clase de servicio 2.

En el Martinete se da una clase de servicio 3, al menos en la actualidad, ya que a pesar de que la humedad relativa del aire no excede el 85%, la humedad medida en las piezas sí es superior al 20%. Esta situación podría variar si se solucionara el problema de las goteras y se aislara la estructura de los muros, sobre todo el que forma parte de la antepara, para evitar la transmisión de humedad de éstos a la madera.

9.5 Modelo de cálculo

El cálculo de la estructura del Martinete se ha realizado mediante el programa de cálculo de estructuras Estrumad. Dada la complejidad del entramado de la estructura y el hecho de no presentar una simetría se decidió modelizar la estructura en 3D.

Para el cálculo de la estructura se han realizado varias modelizaciones de la estructura. En principio se podrían simplificar como dos modelos principales con diferentes variaciones.



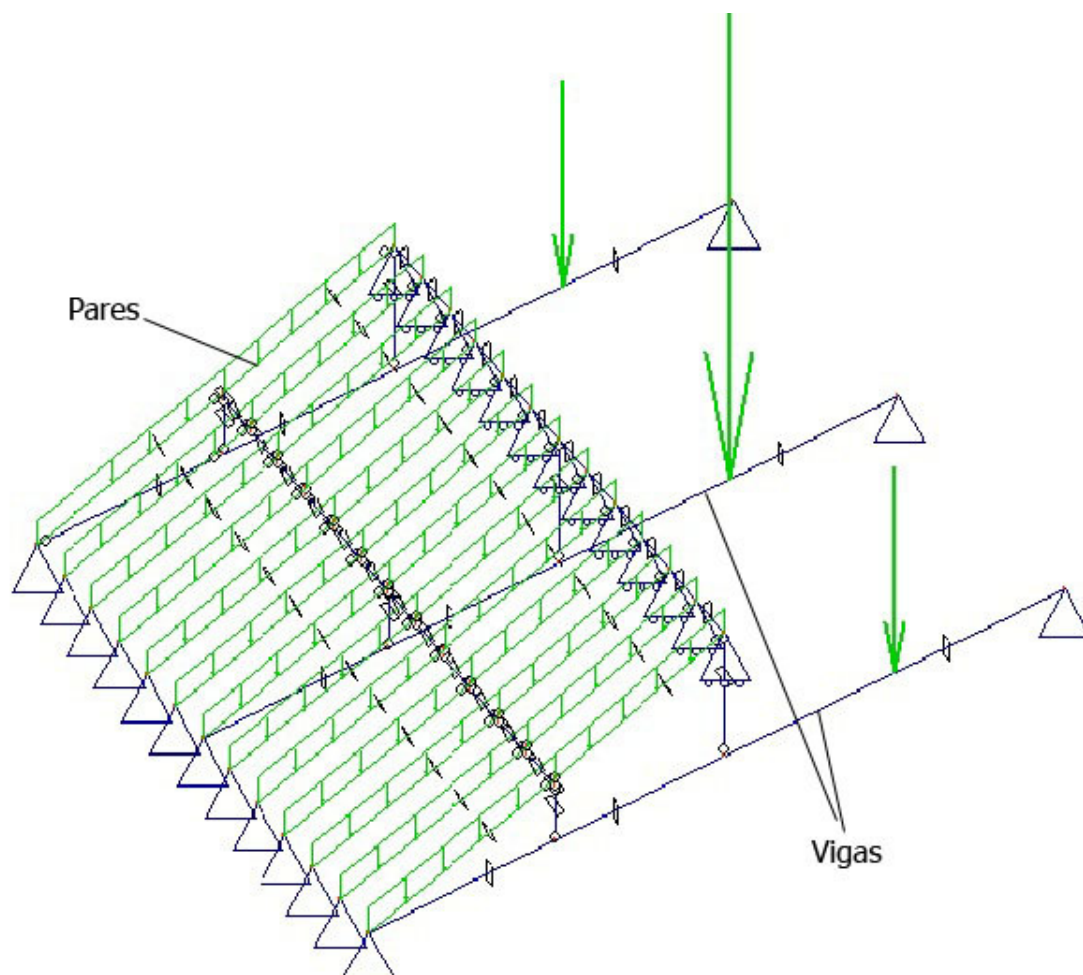
Detalle del modelo global de la estructura.

Uno corresponde a la estructura global, y otro se ha realizado buscando estudiar el comportamiento de los pares. Esto se ha modelizado de este modo para facilitar y simplificar el modelo global de la estructura dada su complejidad y facilitar el funcionamiento del software empleado.

Se ha decidido realizar un estudio aparte de los pares por la singularidad que presenta la estructura que se explicará a continuación.

Los pares se encuentran apoyados sobre unas correas que descansan sobre las vigas principales, este apoyo intermedio no es rígido, sino que presenta cierta flexibilidad. Esta

disposición se ha modelizado representando las vigas principales con los enanos, la correa y los pares de uno de los dos faldones longitudinales de la cubierta. En las vigas principales, se han incluido las cargas correspondientes a las generadas por el otro agua de la cubierta que no se ha modelizado.

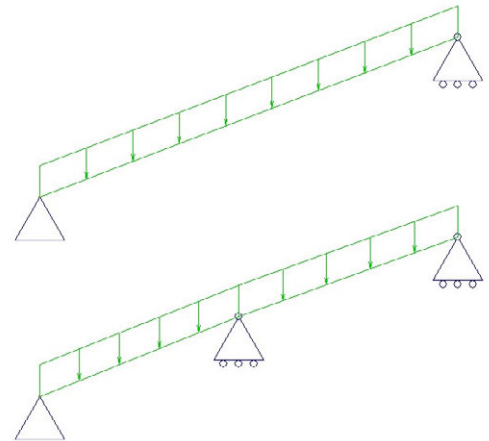


Detalle del modelo de los pares.

De este modo se consigue que el modelo actúe como ocurre en la realidad, es decir, que los apoyos presentan cierta flexibilidad en función de la carga que reciben.

No obstante, como comprobación de este modelo global de los pares, se han modelizado dos hipótesis extremas para un par. Los pares poseen un apoyo intermedio en la correa, pero la correa no es un apoyo fijo, sino que tiene una flexibilidad que es lo que se ha representado en el modelo de pares. Por motivos de seguridad y para comprobar que la hipótesis planteada es correcta, se ha modelizado el comportamiento de un par de dos modos:

- Primero como si fuera biapoyados, de modo que la correa fuera totalmente flexible, lo cual no es cierto.
- Segundo como si estuviera biapoyada con un apoyo intermedio fijo que no se desplazara, lo cual tampoco representa el comportamiento real.



Modelo para la comprobación de la hipótesis de los pares

Estas dos hipótesis sirven para contrastar los valores obtenidos con la hipótesis real. Estas dos hipótesis extremas que se plantean simplificadas para un par, corresponden:

- Por un lado, a la situación más desfavorable, es decir, podría actuar como si estuviera biapoyado, en el caso de que no existiera la correa o ésta fuera completamente flexible.
- Por otro lado, a la situación más favorable, en el caso en el que actuase como si hubiera un apoyo intermedio a la altura de la correa y este fuera rígido.

Los valores obtenidos en este caso deben servir de referencia límite para los obtenidos con el modelo global.

En la modelización del funcionamiento de los pares nos encontramos con varias hipótesis, dos de ellas correspondientes al comportamiento inferior del apoyo de los pares, debido a que no se puede determinar con exactitud si actúa como una articulación al estar apoyado en un durmiente o bien como una deslizadera ya que ese durmiente, en los tramos que se ha podido observar, está muy deteriorado debido a un elevado estado de pudrición y en algunos puntos ha desaparecido. Por ello se ha modelizado el comportamiento global de

los pares de las dos formas, suponiendo que el apoyo inferior es una articulación y suponiendo que es una deslizadera, para observar así los distintos índices de agotamiento y evaluar los posibles estados más desfavorables.

Se ha realizado una primera hipótesis de cálculo, correspondiente a la situación original, en la cual se aplican unas cargas correspondientes a la actual situación y acordes también con la normativa vigente. En esta modelización inicial no se ha tenido en cuenta la merma de la sección eficaz debido a los diferentes ataques que ha sufrido la madera. Este planteamiento se ha realizado primero suponiendo una clase resistente C14, que ha sido el valor más conservador que se ha obtenido en base al estudio de las técnicas no destructivas realizado, y posteriormente se ha calculado como si se tratase de una clase resistente C22.

La siguiente hipótesis que se ha realizado busca encontrar una respuesta al estado actual que se ha observado. Para ello se ha calculado con una merma de la sección en función del grado de ataque que presenta la estructura. Para esta estimación, se ha tenido en cuenta las lecturas tomadas con el Pilodyn®, se ha estimado que en madera sana el Pilodyn® da una lectura media de 7 mm, en base a las pruebas realizadas, y este es el valor que se empleó como límite a partir del cual en cada pieza se redujo su sección en todo su perímetro la diferencia entre la lectura máxima tomada con el Pilodyn® y los 7 mm estimados como normales de madera sana. Esta hipótesis sólo se ha realizado en el modelo global de la estructura ya que debido al elevado grado de deterioro que presentan los pares no tiene sentido realizarlo con el modelo simplificado de los pares.

La última hipótesis planteada se corresponde con un análisis estructural de una de las propuestas de mejora planteada que consiste en la restauración de la cubierta con un aligeramiento de la misma de un 27%.

10 RESULTADOS DE CÁLCULO

10.1 Resultados estado inicial C14

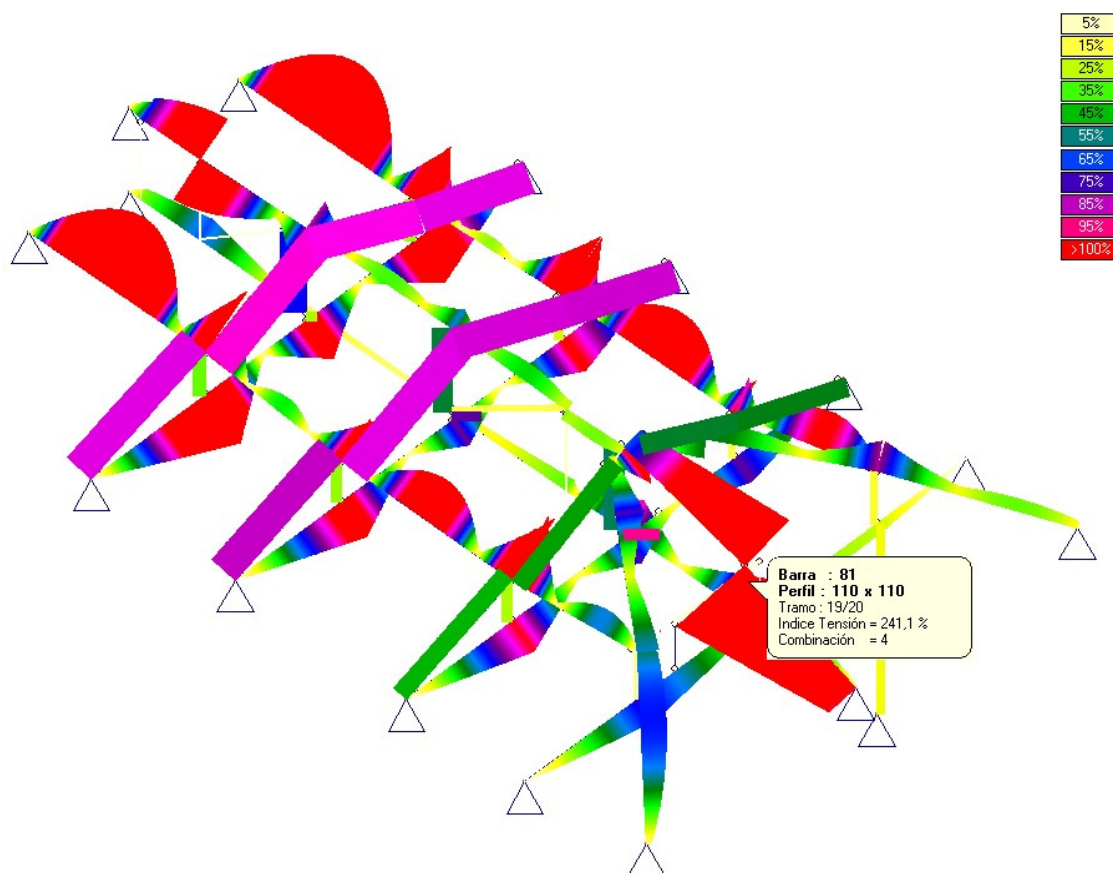
Una vez modelizada la estructura en el programa Estrumad se procedió a calcularla y se obtuvieron los valores de los esfuerzos axiles, cortantes y momentos flectores y los índices de agotamiento para cada una de las barras de la estructura. Todo ello de acuerdo con las hipótesis de carga planteadas y las combinaciones de hipótesis en base al Código Técnico de la Edificación.

Estas comprobaciones se realizaron para los modelos anteriormente descritos.

- Modelo global

En base a esos resultados tenemos que las barras del modelo general de la estructura 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 38, 39, 55, 56, 57, 58, 60, 61, 65, 66, 67, 68, 78, 80 y 81 están fuera de la norma debido a la tensión normal. Estas barras se corresponden con las piezas VL11, VC1.4, VC2.4, apoyo superior de C2, C4 y C6, la pieza C1, parte de C2 y las piezas C3 y C5.

El mayor índice de agotamiento se alcanza en la pieza C5 con un valor del 241,1 %.

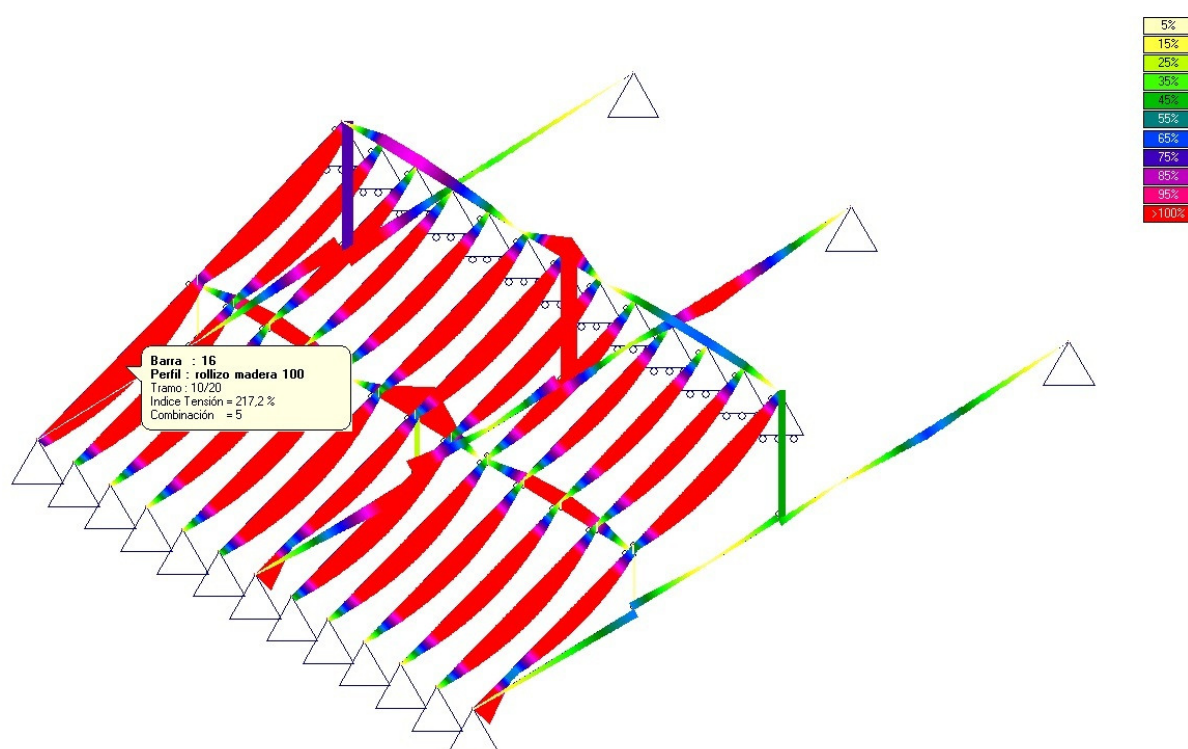


Modelo general cálculo con dimensiones iniciales C14

- Modelo pares

En el modelo de los pares, se ha realizado dos cálculos. En un primer lugar se ha calculado como si los pares en su apoyo con el muro fuera una articulación que es lo que cabría esperar.

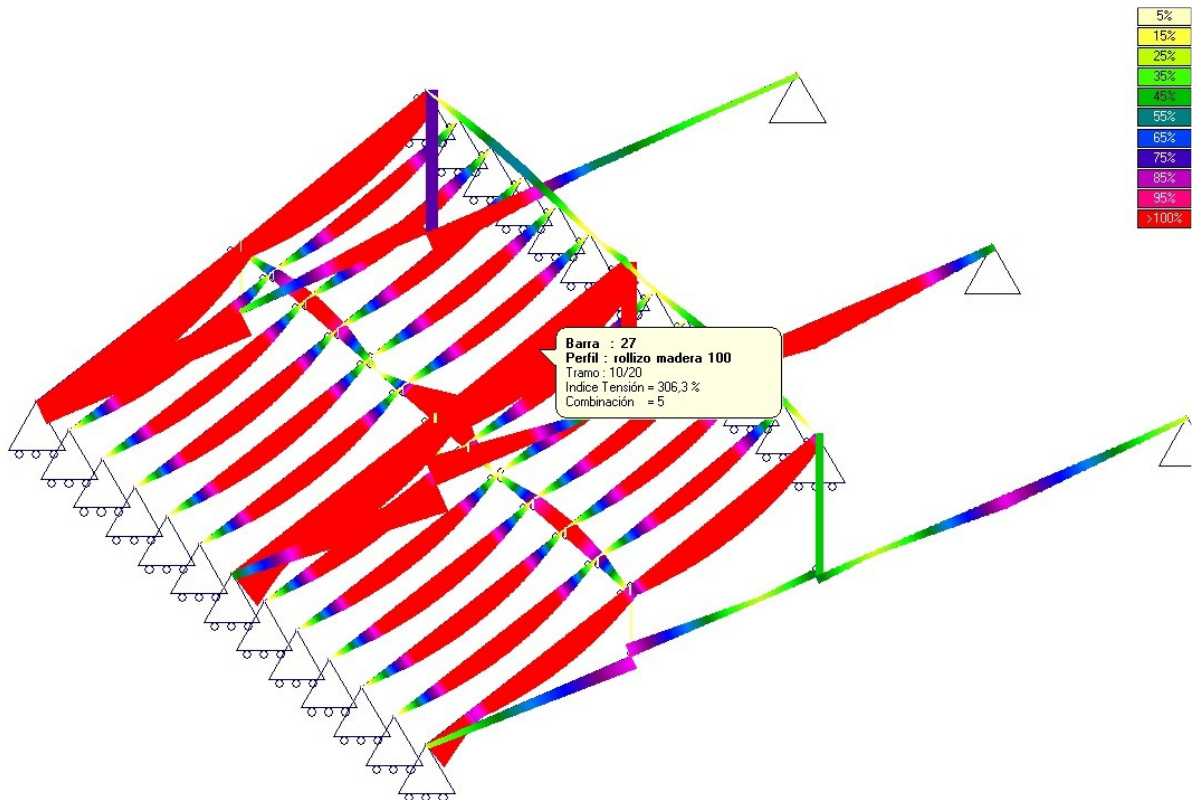
En este caso el índice de agotamiento que presentan los pares es muy elevado, sobrepasando en todos los casos el agotamiento permitido. Los índices de agotamiento oscilan entre 131,3% y 217,2% que alcanza como valor máximo.



Modelo pares cálculo dimensión inicial C14 apoyos articulados

Pero dado el mal estado de los durmientes, ya que allí donde se han podido observar, se ha comprobado que presentaban un elevado grado de degradación y en buena parte del perímetro han desaparecido. Se ha realizado un cálculo comprobando el comportamiento de los pares como si el apoyo inferior de los pares se tratase de una deslizadera.

En este caso los resultados son más desfavorables todavía, obteniendo valores del índice de agotamiento comprendidos entre 119,6 % y 306,3 % como valor máximo.



Modelo pares cálculo dimensión inicial C14 apoyos deslizadera

Estos datos se han obtenido debido a que la clase resistente estimada es quizá muy baja, pero el estado de conservación no permite aventurar una clase resistente mayor. Además en la cubierta se aprecian abombamientos lo cual confirma la insuficiencia de los pares para este diseño estructural.

Como positivo en los pares tenemos que están formados por rollizos por lo que al no haber cortado ningún anillo de crecimiento su resistencia es algo mayor que la que tendría una sección escuadrada de la misma superficie. Posiblemente esto junto con que en origen la madera fuera de una mejor calidad a la estimada sean los motivos por los cuales la cubierta ha durado hasta nuestros días.

En base a estos resultados no se puede asegurar la seguridad de la estructura con esa clase resistente y con ese diseño estructural.

Estos resultados hacen plantearse otras hipótesis, ya que si bien la estructura ha fallado, no es menos cierto que se ha mantenido y no ha fallado por donde cabría esperar en un principio en vista a estos resultados.

10.2 Resultados estado inicial C22

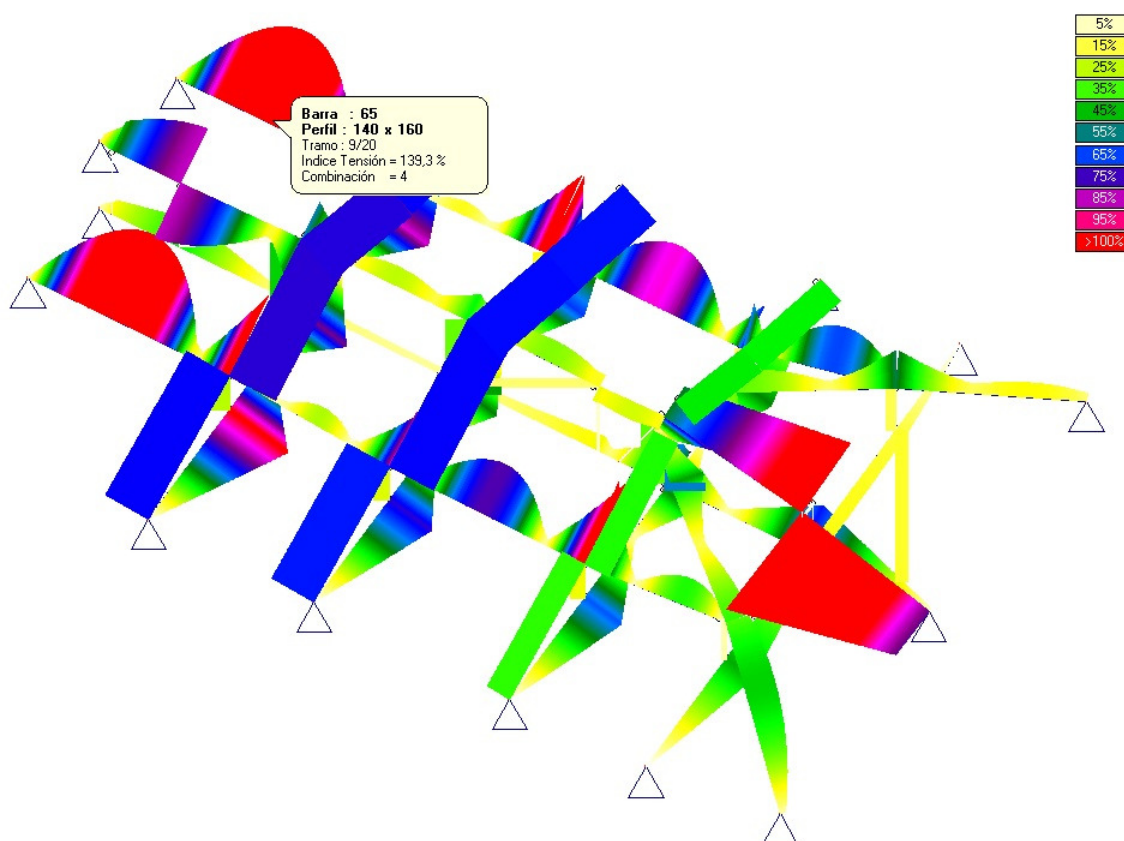
En vista a los resultados obtenidos en el cálculo realizado con una clase resistente C14, se ha decidido recalcular la estructura asignando una clase resistente mayor.

Esto se ha planteado con el fin de evaluar la viabilidad del diseño estructural con una clase resistente mayor y razonable. Por ello se ha establecido una clase resistente C22.

Se ha elegido una clase C22 porque es la que se asigna según el Documento Básico Seguridad Estructural-Madera 2009 para la madera clasificada como MEG de la norma “UNE 56.544 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural”. Este procedimiento servirá para determinar si el diseño estructural podría mantenerse con la simple sustitución de la madera existente por otra con unas características fácilmente exigibles y reconocibles en el mercado.

- Modelo global

Si en vez de suponer una C 14 como se ha estimado con los datos obtenidos en los ensayos no destructivos, se calcula con una C22, obtenemos que las barras que no cumplen los cálculos son las 10, 11, 55, 56, 57, 58, 65, 66, 67, 80 y 81, todas ellas por tensión normal.



Modelo general cálculo con dimensiones iniciales C22

Estas barras se corresponden con las piezas VC1.4, C1, C3 y C5, correspondientes a una de las vigas principales, a las correas y a una pieza situada en el tercer faldón.

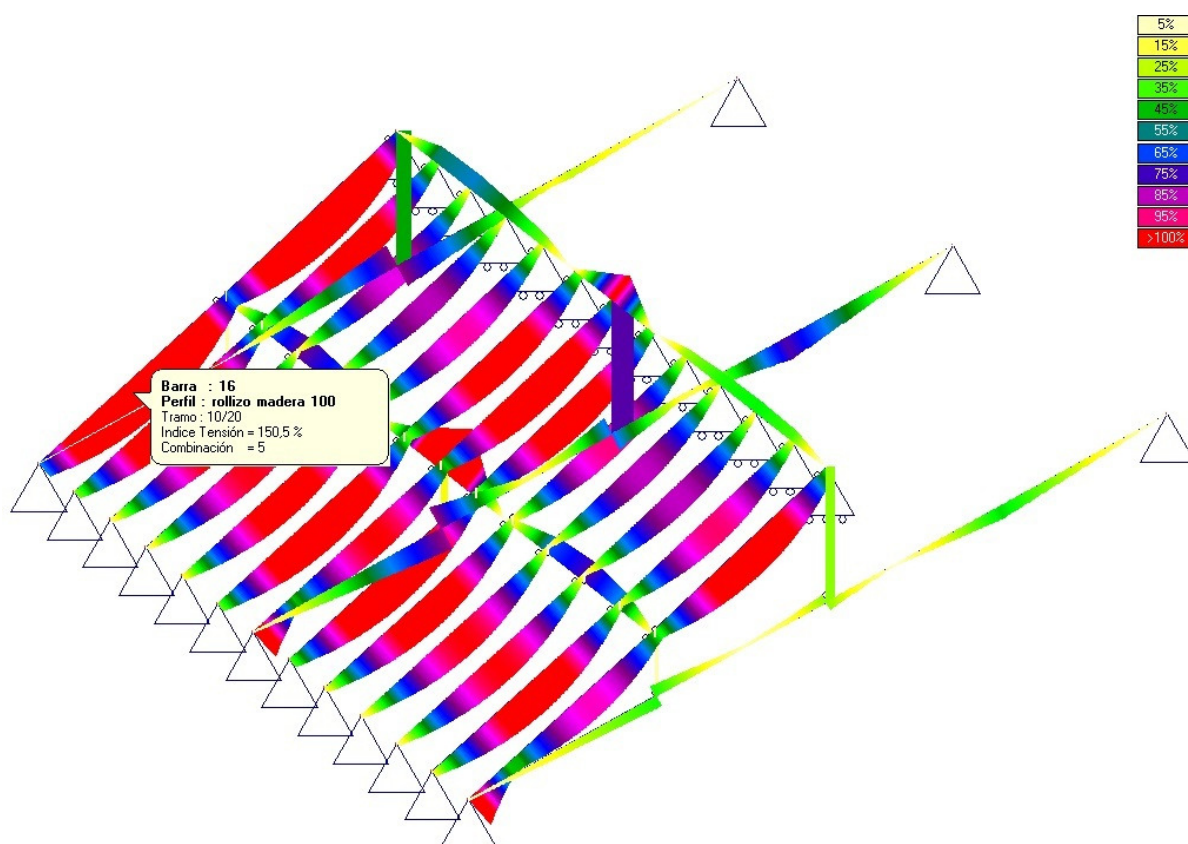
En este caso se observa que los índices de agotamiento disminuyen si bien sigue habiendo piezas que no cumplen la normativa. Los valores que alcanzan los índices de agotamiento en este caso oscilan entre el 101,7 % que alcanza la viga principal y el 169,3 % que toma la pieza C5 correspondiente al tercer faldón.

- Modelo pares

El modelo pares se ha calculado también suponiendo una clase C22 y se han mantenido las hipótesis planteadas en un principio, calculando como si los apoyos fueran articulados o bien, como si fueran deslizaderas.

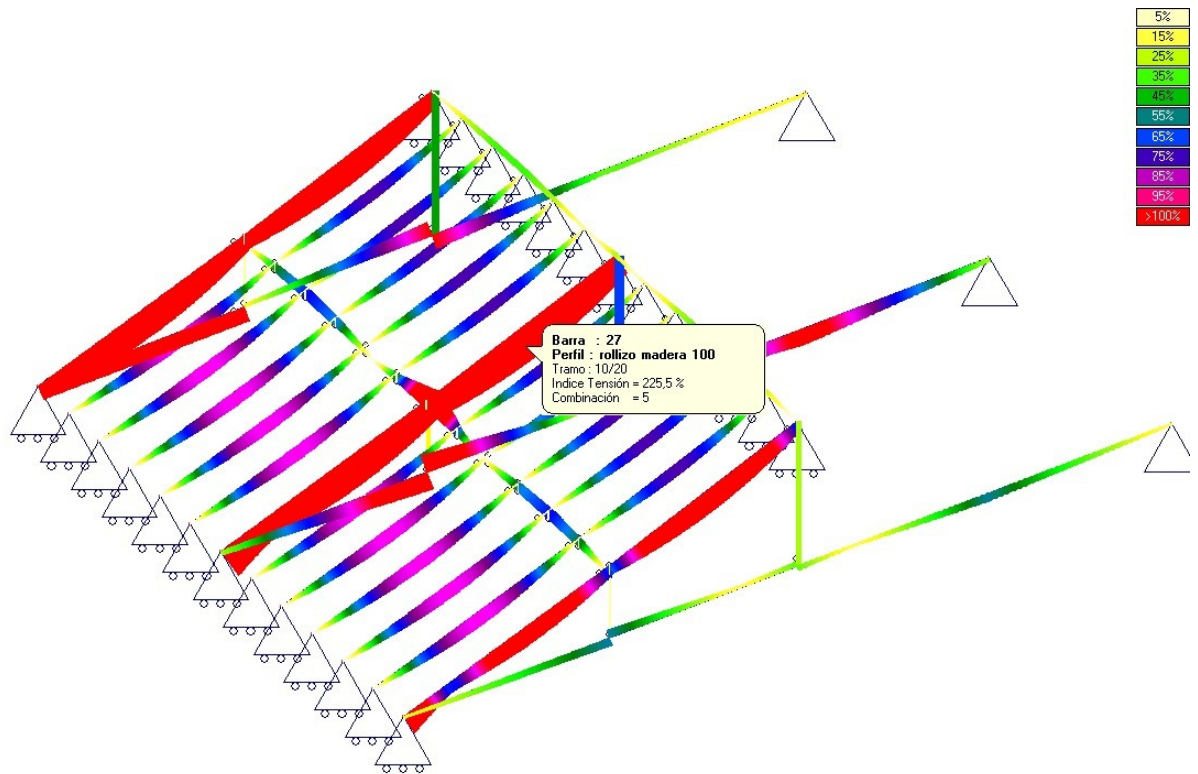
En el caso de considerar los apoyos como articulaciones se tiene que no cumplen 7 de los 13 pares modelizados y los pares que sí cumplen tienen unos índices de agotamiento

cercanos al 100%. El mayor índice de agotamiento que se alcanza toma un valor de 150,5%.



Modelo pares cálculo dimensiones iniciales C22 apoyo articulado

Si se considera que en la estructura los apoyos de los pares actúan como deslizaderas debido al mal estado de los durmientes, entonces se obtiene un resultado interesante. Sólo hay 3 de los pares que superan los índices de agotamiento, por lo cual el comportamiento de la estructura en un principio parece que es mejor, pero en estos casos el índice de agotamiento toma valores mucho más altos, llegando a alcanzar un valor máximo de 225,5%. Esto se produce en los pares que en el modelo están ligados a las vigas principales lo cual impide que se deslicen libremente al estar unido a la viga principal. Es por esto por lo que tiene un comportamiento diferente al resto de los pares.



Modelo pares cálculo dimensiones iniciales C22 apoyo deslizadera

El fenómeno de deterioro que han sufrido los durmientes ha podido provocar que los índices de agotamiento sean menores al trabajar los pares de una forma diferente a lo normal. Pero este hecho ha llevado a un deterioro de la cubierta debido a las deformaciones que en ella se han producido generando innumerables goteras y los consiguientes problemas que estas han producido (humedades, pudriciones, etc.).

10.3 Justificación del estado actual observado

Los valores obtenidos en los diferentes análisis realizados hasta el momento, a pesar de superar los índices de agotamientos permitidos, no justifican el colapso observado en la estructura.

En este apartado se pretende plantear una hipótesis en base a la inspección realizada y a los resultados obtenidos en los diferentes ensayos no destructivos con el fin de poder explicar en cierta medida el por qué de la situación actual.

Esta hipótesis se basa en que los daños que presenta la estructura son elevados y éstos han generado una disminución en la sección eficaz de las piezas que conforman la estructura.

Los criterios que se han seguido para la estimación de la sección eficaz se han basado en los ensayos no destructivos realizados y en las observaciones.

Se ha tenido en cuenta las lecturas tomadas con el Pilodyn® y se ha estimado, en base a pruebas realizadas, que en madera sana el Pilodyn® da una lectura media de 7 mm. Este es el valor que se empleó como límite a partir del cual en cada pieza se redujo su sección en todo su perímetro la diferencia entre la lectura máxima tomada con el Pilodyn® y los 7 mm estimados como normales de madera sana. Esta hipótesis sólo se ha realizado en el modelo global de la estructura ya que debido al elevado grado de deterioro que presentan los pares no tiene sentido realizarlo con el modelo simplificado de los pares.

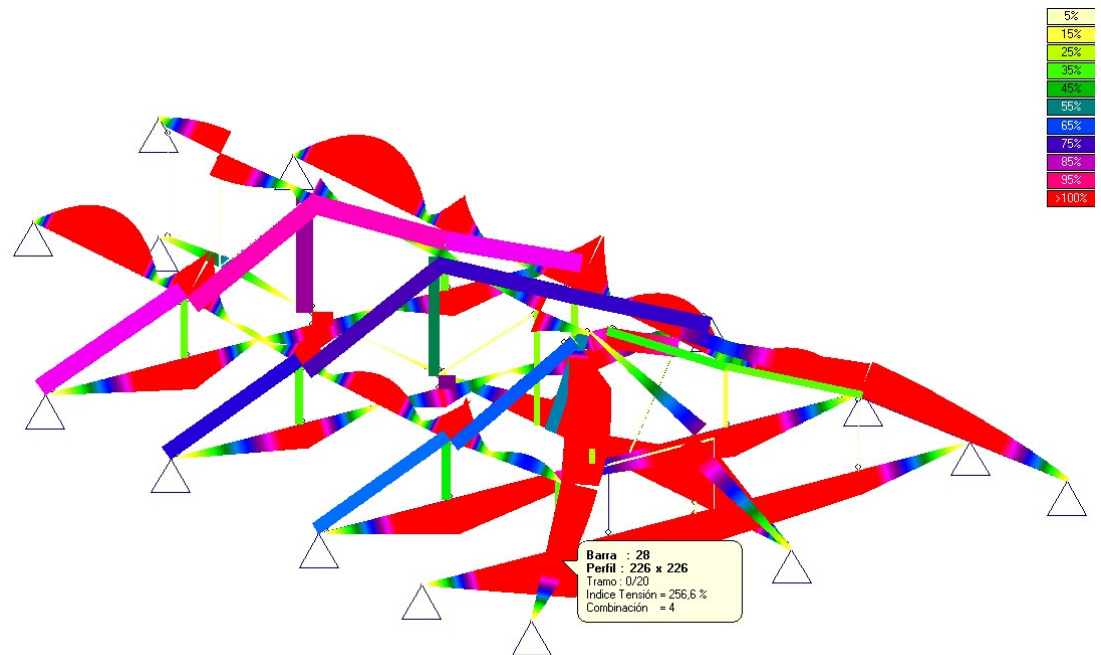
Además en esta hipótesis se ha eliminado el pilar del modelo, ya que se ha observado que debido a una pudrición que presenta en la base, generada por la falta de ventilación y el acúmulo de hollín, la longitud de este ha disminuido en al menos 10 cm perdiendo así la función estructural que tenía en un origen.



Detalle donde se aprecia el descenso del pilar respecto su posición inicial debido a la pudrición.

Se ha introducido algo más de carga en la limatesa Norte ya que presenta un enano extra y un refuerzo que es posterior al diseño original lo cual ha ocasionado una sobre carga en esta zona.

En base a estos planteamientos se han obtenido los siguientes resultados.



Modelo general cálculo dimensiones reducidas C14 justificación rotura

Se observa que en la zona donde se produce la rotura se alcanza un índice de agotamiento del 256,6% que es muy elevado y puede justificar la rotura observada.

Caben innumerables hipótesis sobre el porqué de esta rotura. Por ejemplo cabe suponer que en esa zona fue donde se depositó el material para el retejado en las reformas, ya que era la de más fácil acceso para la maquinaria, y supuso un sobrepeso que no soportó la cubierta, o bien a causa una nevada extraordinaria. Por lo que se aprecia y visto el refuerzo que se realiza en la lima más cercana a la rotura puede ser que la estructura fallara al no soportar bien las cargas la viga VC3 y se sobrecargase la pieza VC4 que finalmente se rompió. No obstante estas hipótesis no dejan de ser conjeturas que no permiten determinar con exactitud los motivos de la rotura, ya que no se sabe con exactitud el momento ni las causas de la rotura.

Si se quisiera mantener el actual diseño constructivo se podría realizar redimensionando estas piezas y disminuyendo el peso de la cubierta con materiales más ligeros como lana de roca y fibroasfalto.

Dada la importancia del Martinete de Navafría, al ser un Bien de Interés Cultural, y estimar oportuna su restauración lo más fielmente posible a los orígenes, se ha decidido realizar la comprobación de la estructura con una mejora en los materiales existentes buscando una disminución en el peso de la cubierta y redimensionando sólo las piezas que sean necesarias.

11 CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE ACTUACIÓN

En base a los resultados obtenidos, tanto en la inspección como con los análisis no destructivos empleados y con la comprobación del cálculo estructural, se llega a la conclusión de que es necesaria la realización de una restauración de la cubierta del Martinete si se quiere garantizar su conservación.

Se ha concluido que la restauración debe ser total de la cubierta y que dado el mal estado de conservación de las piezas debido a las diversas patologías que presentan no se pueden reutilizar en la restauración. Además se recomienda que la madera que se emplee en la restauración esté tratada para, al menos una clase de uso 3, siendo recomendable, que sea tratada para una clase de uso 4, ya que el coste no es muy superior.

A continuación se proponen una serie de medidas a tener en cuenta en la realización de la restauración para corregir los problemas que se han detectado en la actual construcción.

- La madera que conforma toda la estructura se recomienda que esté protegida al menos para una clase de uso 3. Esto es debido a las condiciones de humedad que presenta el edificio ya que se han tomado valores en torno al 75% de humedad ambiental, y en las piezas de madera existentes se han medido valores de humedad superiores al 20%. Esta humedad no se espera que disminuya debido a que el Martinete presenta un sistema de conservación del ingenio que consiste en mantener constantemente húmeda la madera del mecanismo, de modo que esté saturada de agua lo que impide que se desarrollen patógenos. Además el edificio se encuentra ubicado en una zona donde confluye la escorrentía situada aguas arriba y en época de lluvias corre por el interior del mismo el agua al no ser posible su drenaje, ya que el edificio se encuentra situado sobre roca madre (condición fundamental para situar un martinete y que éste sea funcional). Dado que se va a realizar el tratamiento frente a patógenos puede ser interesante aplicar un tratamiento frente al fuego para que no sea necesario aumentar demasiado la sección y desvirtuar el aspecto original del edificio.
- El pilar de la estructura debe presentar una basa que le aisle del suelo para evitar que le transfiera humedad. Esto es muy importante ya que al encontrarse en una zona donde se acumulaba el hollín y demás restos, ha ocasionado que se

produzca una pudrición que ha reducido su longitud en al menos 10 cm. Es necesaria la basa para poder mantener la utilidad del espacio donde se sitúa como zona donde ubicar los restos de hollín generados en la fragua. Se recomienda que esta basa sea de gneis o granito ya que estaría acorde con las piedras del entorno y que forman parte del suelo y los muros del edificio. Las características de esta basa deben ser suficientes para que sobrepasen la altura de los restos de hollín y permita un buen aislamiento del suelo y de la humedad que dichos restos pudieran transmitir. Esta basa debe estar diseñada de modo que no se produzcan acumulaciones de humedad.

- Realización de un saneado de las cabezas de los muros de piedra con base de mortero para asentar la estructura. Dado el estado en el que se encuentran los muros es necesario para evitar el derrumbe que ya se ha iniciado en el muro Este y eliminar los restos del durmiente original. Esto se llevará a cabo con el objetivo de asentar y nivelar la cabeza de los muros buscando que la estructura se asiente sobre un plano a nivel. También es conveniente que se coloque una barrera antihumedad por todos los muros para evitar la transmisión de humedad a los pares y otros elementos estructurales de madera.
- Realizar un cajeado suficiente para garantizar la ventilación y aireación de la cabeza de las vigas de la estructura de madera. En la zona de los apoyos de las vigas con los muros es importante el realizar un diseño estructural que permita la correcta ventilación de la cabeza de las vigas de manera que la madera no acumule humedad. Esta solución es una garantía para la conservación de la madera como se ha comprobado en el análisis, ya que la estructura presentaba pudriciones en aquellas zonas donde había más humedad y no se permitía una correcta ventilación.
- Se recomienda poner una capa de neopreno o algún otro material impermeable en la zona de apoyo de la cabeza de las vigas para mejorar y garantizar su aislamiento de la humedad que pueda transferir el muro, sobre todo en el muro Sur, ya que es la antepara.
- Se aconseja una restauración y asentamiento de los muros, en especial del muro Este ya que la cercha que está embebida en el muro sufre una pudrición total y ha

desaparecido en buena parte (>30%). Este hecho ha ocasionado que parte del muro se haya caído en parte y lo que queda presenta cierta inestabilidad que es conveniente solucionar.

Otras observaciones realizadas en la elaboración del presente estudio y que se considera importante que sean tenidas en cuenta.

- Es muy importante el correcto mantenimiento del sistema de riego del mecanismo ya que se ha mostrado efectivo. Se recomienda que se mantenga y se mejore en aquellos puntos donde el riego de las piezas del mecanismo sea deficiente. La importancia del buen funcionamiento de este sistema se hace patente en el eje del martillo pilón. Esta pieza sólo está regada por la parte en la que actúan las levas del eje de la noria y en la zona del cepo donde el agua se emplea como lubricante. Este hecho ha originado que esta pieza presente una pudrición muy importante justo en la frontera que separa la zona de la cabeza del martillo, que no está mojada y la otra que sí mantiene unos contenidos de humedad cercanos a la saturación. La pudrición sólo se presenta en la zona de separación, ya que en las otras zonas bien por exceso o bien por defecto no presentan los contenidos de humedad suficientes para permitir del desarrollo de los patógenos.
- Se recomienda una revisión de la impermeabilización de la antepara y mejora de las deficiencias que se puedan observar, así como una limpieza de los lodos y arena acumulados en el depósito.
- El eje de la noria, en su parte exterior presenta una holgura de unos 4 cm lo cual ocasiona un peligroso cabeceo de la misma, así como unos fuertes impactos cada vez que se pone en funcionamiento. Este problema se ha solucionado a lo largo de la historia del Martinete mediante la introducción de diversas cuñas y clavos tanto de madera como de hierro. El efecto de los clavos de hierro, al presentar una resistencia mayor de la madera y tener una superficie de apoyo muy pequeña ha originado con el tiempo que la holgura sea mayor. Por ello se recomienda que se solucione mediante la colocación de unas cuñas de madera. Estas cuñas se aconseja que sean de una madera dura como la encina para que aguanten los esfuerzos a los que está sometido el eje.

- Se recomienda la colocación en la chimenea de un matachispas de modo que evite la salida de pavesas cuando se realicen las demostraciones del funcionamiento del Martinete reduciendo el riesgo de incendios y evitando la entrada de agua por la chimenea los días de lluvia (esto último en la actualidad se evita mediante la colocación de una chapa que se retira cada vez que se realiza una demostración, teniendo que subirse al tejado para la retirada y posterior colocación de la misma con los riesgos que ello conlleva.

12 PROPUESTA DE NUEVA CUBIERTA

Dado el estado actual de la cubierta, la gran cantidad de goteras existentes y el mal estado de los pares y de la estructura en general se propone realizar el cambio de la cubierta. Además esta propuesta se hace más necesaria al haberse comprobado que la estructura no cumple con el Código Técnico de la Edificación.

Para la nueva estructura de la cubierta se propone mantener el diseño estructural inicial. Para que esto sea posible es necesario reducir el peso de la cubierta y redimensionar aquellas piezas que no cumplan con la normativa.

En un principio se ha planteado el emplear panel sandwich por su comodidad de montaje y las propiedades que presenta, pero finalmente se ha decidido mantener la estructura original del entramado de ripia, para poder mantener el aspecto lo más parecido al original.

En el diseño se ha buscado que la cubierta sea ligera (menos de 1 kN/m^2) y no sólo eso sino que además sea más ligera que la actual opción formada por ripia, mortero y teja segoviana. La cubierta ligera permite disponer los medios para garantizar los aislamientos necesarios.

A continuación se pasa a desglosar la estructura planteada como posible alternativa, y que ha sido tomada en cuenta a la hora de realizar los cálculos para comprobar si es posible el mantener la estructura de la cubierta reproduciendo fielmente el diseño original o no. Para estos cálculos se han empleado datos obtenidos de catálogos de diferentes casas comerciales. Esto no se ha realizado con ningún fin publicitario, de modo que se podrán emplear tanto los materiales propuestos como otros de otras marcas que mantengan las mismas propiedades y características, sobre todo en cuanto a peso.

La estructura de la cubierta rehabilitada que se propone busca mantener un aspecto lo más fiel posible al diseño original.

Para ello estará conformada por una ripia, una capa de aislante para evitar condensaciones que transfieran humedad a la madera y una capa de fibroasfalto.

Se propone una cubierta ligera formada por fibroasfalto debido a las características que presenta:

- Impermeabilidad. Gracias a su composición, a base de fibras minerales y vegetales y resinas termoestables saturadas en asfalto a alta temperatura.
- Flexibilidad. Absorbe los movimientos estructurales sin fisurar.
- Ligereza. Pesa 3 kg/m². Es muy importante la utilización de materiales ligeros en rehabilitación y restauración.
- Formato ondulado. Crea un “tiro” de ventilación, lo cual favorece que la madera esté aireada y ventilada y no acumule humedades.
- Adaptabilidad. Su flexibilidad y facilidad de manipulación permite que la placa se adapte a las irregularidades de la cubierta, encuentros, limas, etc.

Con el fin de mantener una estructura visual más adecuada a las características del edificio, se propone como mejor opción la de mantener una estructura de ripia de pino por mantener su aspecto. El peso de esta estructura será:

- Ripia de madera de pino nacional 15x2,5 cm tratada al menos para clase de servicio 3 peso (densidad 600kg): 0,15 kN/m².
- Barrera de vapor tipo tyvec: 113 g/m² → 0,0011 kN/m².
- Aislamiento térmico planteamos 2 posibles soluciones, ambas con el mismo peso y espesor de 80mm y un peso de 0,018 kN/m²:
 - Filtro de lana de roca impregnada de resina fenólica. Revestido por una de sus caras con papel kraft. Roulrock 121.
 - Filtro de lana de roca impregnada de resina fenólica. Revestido por una de sus caras con un complejo de aluminio reforzado que hace de barrera de vapor. Roulrock ALU 122.
- Barrera de nieve o fibroasfalto tipo onduline BT-50: 0,029 kN/m²

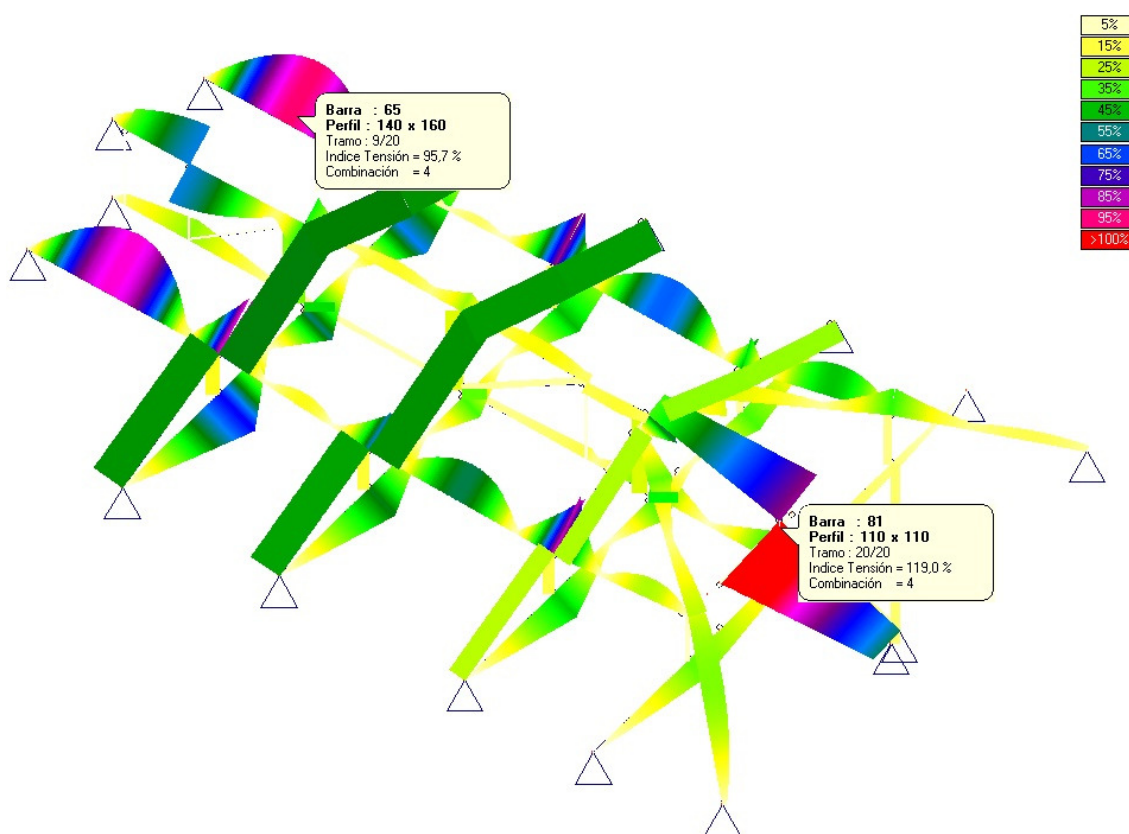
- Teja curva segoviana: $0,4 \text{ kN/m}^2$.

Este entramado constituye una carga total a la estructura de $0,598 \text{ kN/m}^2$ lo que supone una reducción en la carga permanente de la actual cubierta del 27% aumentando considerablemente las propiedades de impermeabilidad de la cubierta.

En base a estos datos se ha calculado la estructura original suponiendo una clase resistente C22 y se ha redimensionado las piezas que no cumplían la normativa.

12.1 Resultado C22 rehabilitado

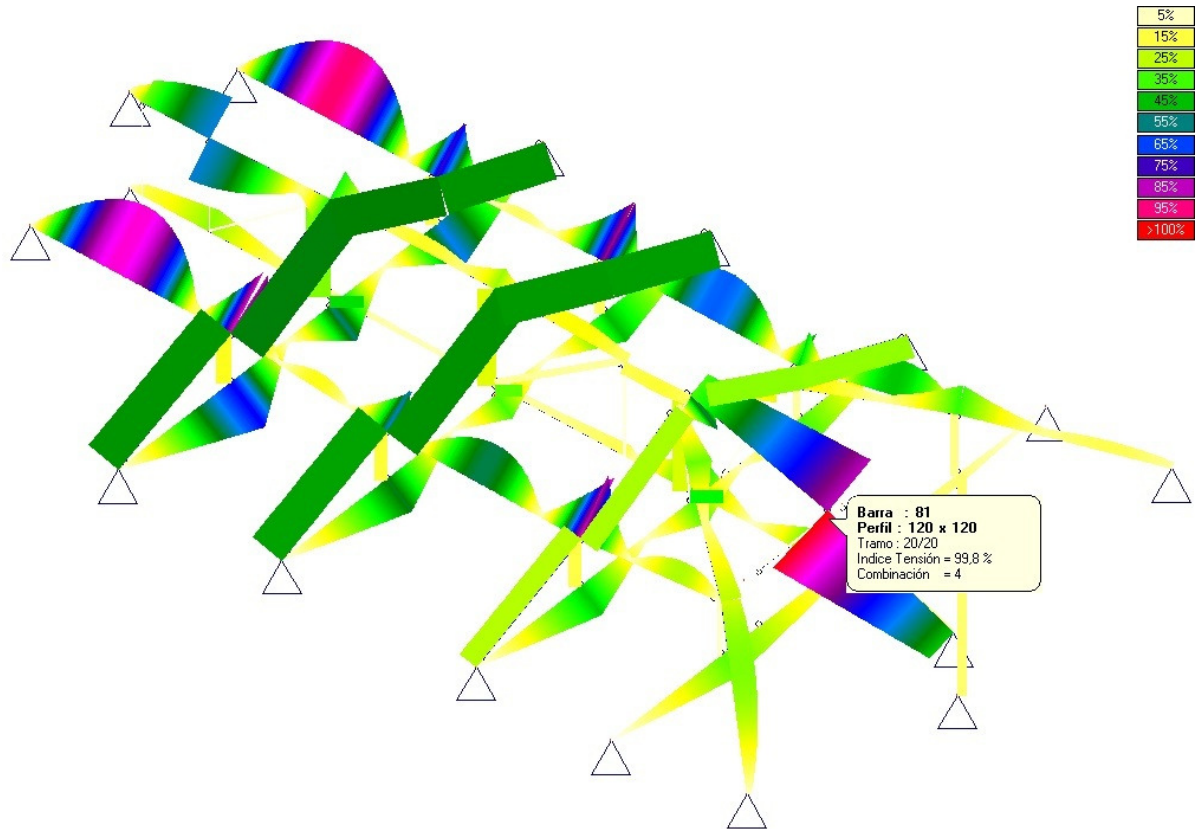
Se ha realizado el cálculo con el diseño original de la cubierta pero reduciendo el peso de la cubierta al cambiar su diseño constructivo por uno más ligero y que mejore las propiedades de impermeabilización de la cubierta, lo cual ha supuesto una reducción del peso de la cubierta de un 27%.



Modelo general cálculo dimensiones iniciales C22 cubierta aligerada

Con estas condiciones la única pieza que no cumple es la barra 81 que se corresponde con la pieza C5, si bien es cierto que las correas aunque cumplen están al límite.

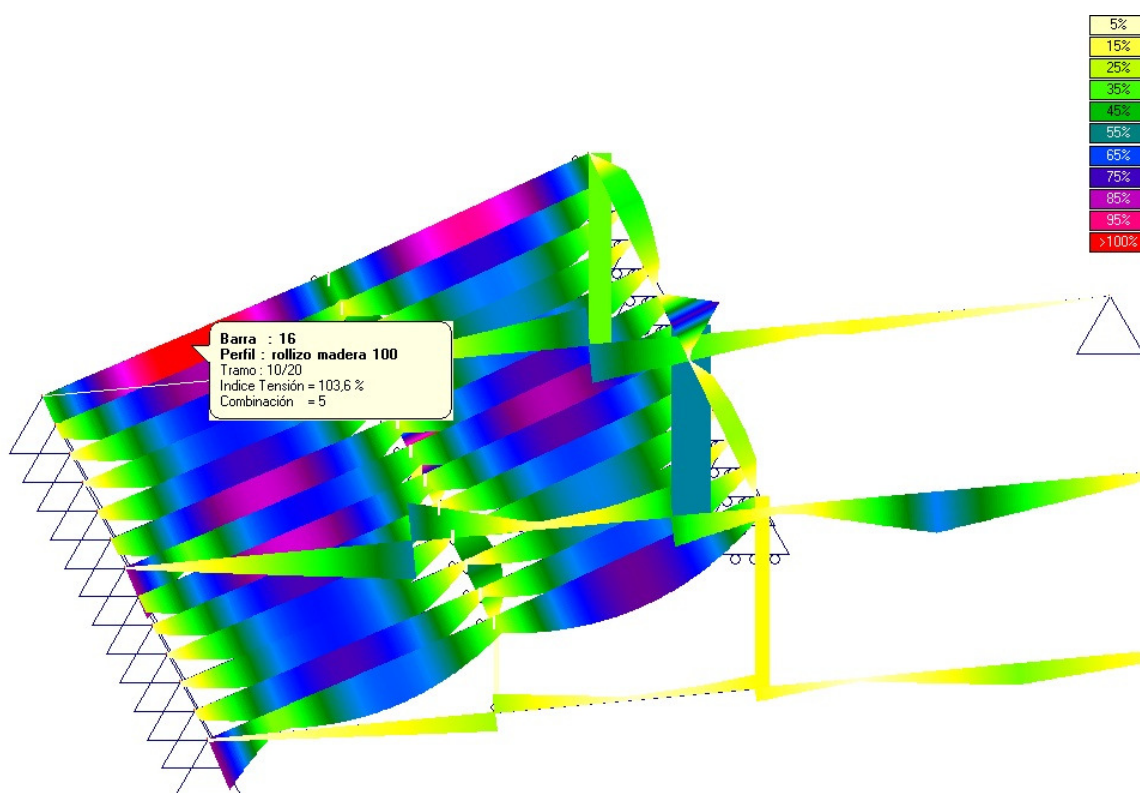
Por ello se plantea un redimensionado de la estructura. En principio bastaría con una sección de 120x120 mm ya que cumple la normativa con un valor de índice de agotamiento del 99,8% como se puede observar:



Modelo general cálculo dimensiones redimensionadas C22 cubierta aligerada

En ningún caso se ha tenido en cuenta la resistencia frente al fuego, que como se explicará más adelante deberá ser al menos R30.

El modelo de los pares tampoco cumple con el Código Técnico de la Edificación, con la reducción del peso de la cubierta como se observa a continuación:

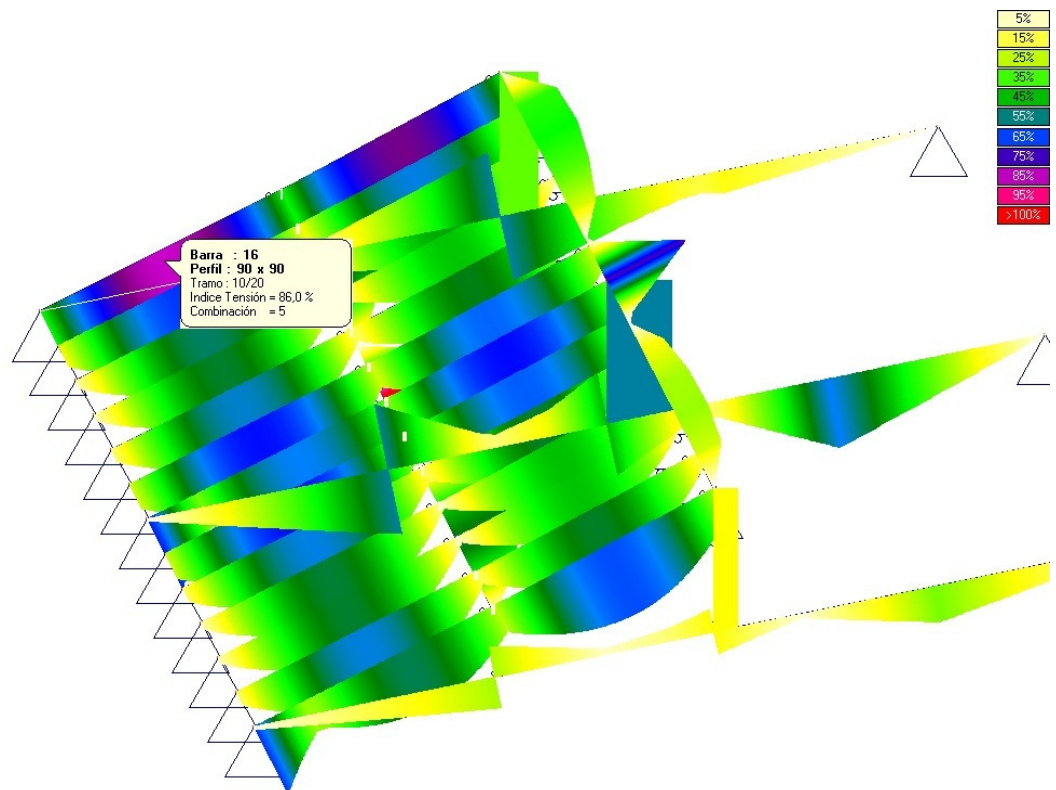


Modelo pares cálculo dimensiones iniciales C22 cubierta aligerada

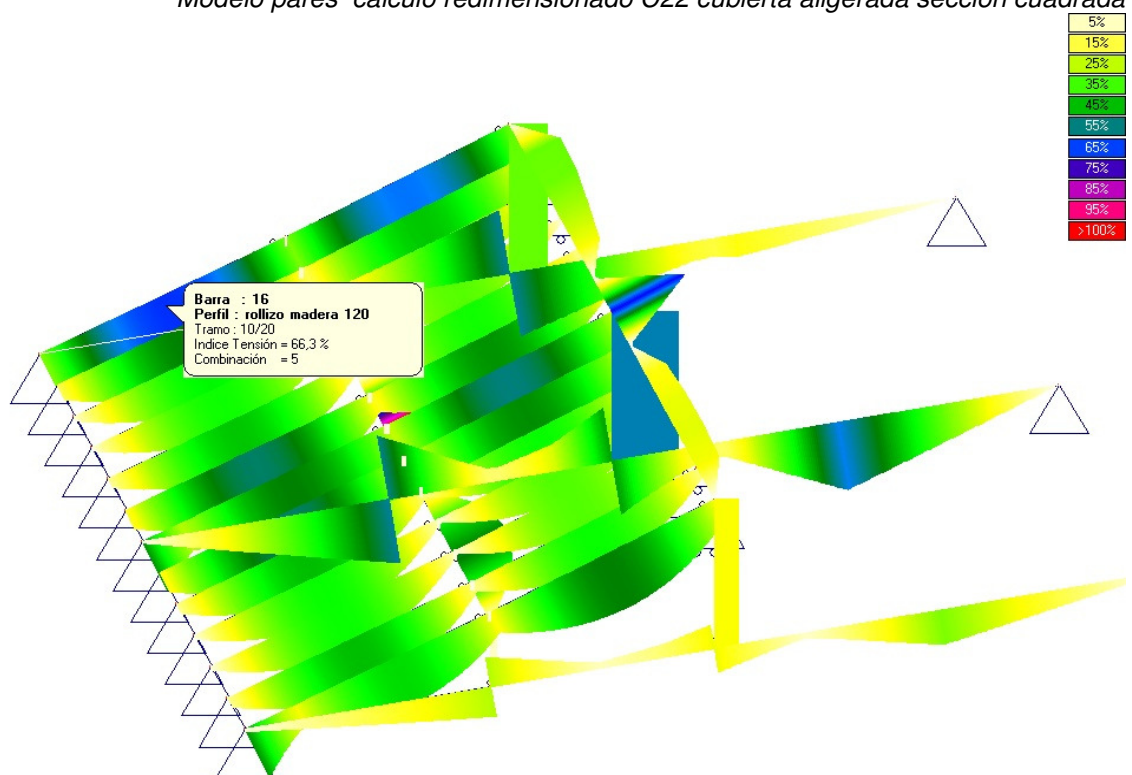
Se supera el índice de agotamiento con un valor de 103,6%

Para que cumpla con la normativa será necesario un redimensionado de las piezas. Respecto a los pares se han planteado dos posibles soluciones a la hora de redimensionarlos. En base a los datos obtenidos era necesario un redimensionado de las secciones de los pares de modo que se ha propuesto por una parte el que los pares tuviesen una sección cuadrada lo cual modificaría en cierto modo el aspecto original, pero, quizá sea una opción interesante por el mecanizado, transporte y posterior montaje de las partes de la cubierta que puede ser más fácil y menos costoso. La otra opción que se ha planteado ha sido mantener la forma original de rollizo pero dando unas dimensiones que cumplan con las exigencias del Código Técnico de la Edificación.

Los resultados obtenidos en el cálculo se observan a continuación:



Modelo pares cálculo redimensionado C22 cubierta aligerada sección cuadrada



Modelo pares cálculo redimensionado C22 cubierta aligerada sección rollizo

Con este redimensionamiento se consigue que la estructura cumpla con las condiciones de resistencia exigidas por el Código Técnico de la Edificación, pero no se ha tenido en cuenta la resistencia al fuego, que dadas las características del edificio debería ser de al menos 30 minutos según el Documento Básico Seguridad en caso de Incendio.

Esta estructura se clasificaría en el epígrafe 3.2 del Documento Básico de Seguridad en caso de Incendio, como estructura principal de las cubiertas ligeras no previstas para ser utilizadas en la evacuación de los ocupantes y cuya altura respecto de la rasante exterior no exceda de 28 m, así como los elementos que únicamente sustenten dichas cubiertas, por lo que podrá ser R 30.

Estas nuevas dimensiones dadas serían insuficientes para el cálculo de la resistencia al fuego por lo que habría que rediseñar la estructura para que cumpliera con las condiciones de resistencia al fuego establecidas en el Documento Básico Seguridad en caso de Incendio para una duración de 30 minutos.

En este nuevo redimensionamiento se propone que se tenga en cuenta la posibilidad de que los pares tengan una sección rectangular o cuadrada frente a la redonda que presentan por la facilidad que aporta en el montaje al colocar la ripia. También se hace notar que si se elige una sección rectangular frente a una cuadrada cabe la posibilidad de una colocación errónea en la sección más desfavorable.

Anexo A. Dimensiones y observaciones iniciales

En este anexo se exponen en una tabla las medidas obtenidas en el proceso de croquización. En la primera tabla aparece la leyenda empleada en la siguiente, el plano de referencia que se nombra es el plano del papel que se empleó en la realización de los croquis. Los croquis se realizaron siguiendo el esquema de conjuntos de piezas expuestos en el comienzo del presente documento y es también el que se ha seguido en la realización de los planos.

Las medidas se han expresado en centímetros para especificar el ancho alto de la pieza y en metros para longitud.

1	Medida paralela al plano del papel según representación (cm)
2	Medida perpendicular al plano del papel según representación (cm)
3	Perímetro (cm)
4	Diámetro (cm)
5	Longitud (m)

PIEZA	1	2	3	4	5	OBSERVACIONES
VC1,1	-	-	42	13,4	0,67	
VC1,2	-	-	45	14,3	1,56	Misma pieza que VL4
VC1,3	-	-	42	13,4	0,70	Se supone igual que VC1,1 por INACCESIBILIDAD
VC1,4	24	24	-	-	8,47	Sección mal escuadrada, presenta esquinas redondeadas con radio de curvatura aprox. de 4cm
VC2,1	-	-	43	13,5	0,73	'-
VC2,2	16	13	-	-	1,63	Es la pieza VL5. Presenta caja de 10x10 en base
VC2,3	13	9	-	-	0,67	'-

VC2,4	26	24	-	-	8,46	
VC3,1	16	13	-	-	0,7	
VC3,2	19	11	-	-	1,6	Gema
VC3,3	16	13	-	-	1,6	Misma pieza que VL9. Caja de 10x10
VC3,4	11	19	-	-	1,5	Gema en la parte baja de 98x8 cm
VC3,5	14	10	-	-	0,7	Muy dañada carcoma
VC3,6	27	30	-	-	8,6	
VC4,1	13	14	-	-	0,90	Está en diagonal a 45º
VC4,2	-	-	43	13,7	3,55	
VC4,3	-	-	35	11,1	2,12	Izq.
	-	-	37	11,8		Dcha.
VC4,4	-	-	39	12,4	0,79	Arriba
	-	-	42	13,4		Abajo
VC4,5	-	-	41	13,1	0,79	Arriba
	-	-	43	13,7		Abajo
VC4,6	13	13	-	-	0,65	Está en diagonal a 45º. Tiene cajado de 3x14,5 a 14cm de la base
VC4,7	-	-	38	12,1	0,78	
VC4,8	23	23	-	-	8,61	Pieza rota a 2,30 del extremo izq.
VL 1	-	-	53	16,9	1,32	Hasta 35 cm de h
	-	-	48	15,3		Resto
VL2	-	-	49	15,6	1,36	
VL3	-	-	45	14,3	2,18	Base
	-	-	50	15,9		Arriba

VL4	-	-	45	14,3	1,56	Es VC 1,2
VL5	16	13	-	-	1,63	Es VC 2,2
VL6	-	-	41	13,1	2,49	
VL7	-	-	31	9,9	1,60	
VL8	9	17	-	-	1,68	Sección superior en media luna
VL9	16	13	-	-	1,57	Es VC 3,3
VL10	10	17	-	-	6,31	
VL11	11	16	-	-	7,49	Sección hasta 2,20m
	11	17	-	-		
C1	15	15	-	-	11	
C2	16	20	-	-	9,4	
C3	16	14	-	-	11	
C4	16	19	-	-		
C5,1	-	-		15	4,7	Parte superior de media madera en apoyo con VC 4
C5,2	11	11	-	-		Parte inferior
C6	-	-		19	6,3	
C7	-	-		15	3,1	

Anexo B. Evaluación e identificación de daños

En un primer lugar, una vez realizados los croquis y la modelización de la estructura se procedió a realizar un estudio visual de las piezas para determinar el tipo de ataque que presentaba y el estado de las piezas

Se procedió a realizar una toma de muestras de los diferentes ataques para poder, posteriormente en laboratorio identificarlos y verificar las observaciones realizadas. Estas muestras se recogieron en bolsitas de plástico y se etiquetaron para su posterior identificación en laboratorio con la ayuda de una lupa binocular. Las muestras que se recogieron eran de los restos que dejan los agentes bióticos, ya que estos detritus nos permiten identificar a los organismos que los han generado en función de cuál sea el tamaño y la forma que tienen, incluso al tacto.

Identificando estas muestras se confirmaron los datos inicialmente recogidos, las piezas presentan ataque de anóbidos, cerambícidos, y pudriciones, y se observó también la posibilidad de la presencia de curculiónidos, pero dado que los daños que estos generan son similares a los producidos por los anóbidos, se ha simplificado su estudio englobándolos bajo el mismo nombre de anóbidos o carcoma.

Para la determinación del grado de ataque se ha empleado una escala del 1 al 5, siendo la norma general el 1 para aquellas piezas no dañadas y el 5 para las piezas muy deterioradas.

Dentro de cada patología esta graduación se detalla un poco más a continuación.

En el caso de ataque por anóbidos: se considera grado 5 cuando la separación entre los orificios de salida de los anóbidos es menos de 1,5 cm de media y grado 1 cuando el ataque no se produce en toda la pieza.

En el caso de ataque por cerambícidos el grado 5 lo asignaría a piezas totalmente atacadas, lo cual no se da afortunadamente, siendo el grado 3 asignado a piezas que si bien no en su totalidad, sí están atacadas en buena parte de ellas

VL1

- Grado de ataque carcoma fina: 5
- Profundidad del punzón 10 mm

VL2

- Grado de ataque carcoma fina: 4
- Grado de ataque carcoma gruesa: 3
- Profundidad del punzón: 5 mm

VL3

- Grado de ataque carcoma fina: 4
- Grado de ataque carcoma gruesa: 3
- Profundidad del punzón: 13 mm

VL4=VC1.2

- Grado de ataque carcoma fina: 3
- Profundidad del punzón: 4 mm

VL5=VC2.2

- Grado de ataque carcoma fina: 3
- Profundidad del punzón: 4

VL6

- Grado de ataque carcoma fina: 4-5
- Profundidad del punzón: 6 mm

VL7

- Grado de ataque carcoma fina: 4
- Profundidad del punzón: 5 mm

VL8

- Grado de ataque carcoma fina: 4
- Profundidad del punzón: 8 mm

VL9=VC3.3

- Grado de ataque carcoma fina: 2-3
- Grado de ataque carcoma gruesa: 4
- Profundidad del punzón: 20 mm

VL10

- Grado de ataque carcoma fina: 2 mayor intensidad zona pieza VC1
- Profundidad del punzón: 10 mm

VL11

- Grado de ataque carcoma fina: 2
- Profundidad del punzón: 8 mm

VC3.1

- Grado de ataque carcoma fina: 3-4
- Profundidad del punzón: 4 mm
- Prueba de MAT en zona sana

VC3.2

- Grado de ataque carcoma fina: 4
- Profundidad del punzón: 8 mm

VC3.3=VL9

- Grado de ataque carcoma fina: 2-3
- Grado de ataque carcoma gruesa: 4
- Profundidad del punzón: 20 mm

VC3.4

- Grado de ataque carcoma fina: 4
- Profundidad del punzón: 7 mm

VC3.5

- Grado de ataque carcoma fina: 4
- Grado de ataque carcoma gruesa: 3
- Profundidad del punzón: 18 mm
- Presenta pudrición

VC3.6

- Grado de ataque carcoma fina: 3
- Grado de ataque carcoma gruesa: 2
- Profundidad del punzón: 20 mm
- Pudrición hongos en zona apoyo

VC4.1

- Grado de ataque carcoma fina: 4
- Profundidad del punzón: 4 mm

VC4.2

- Grado de ataque carcoma fina: 3
- Profundidad del punzón: 6 mm
- Pudrición base 10 cm

VC4.3

- Grado de ataque carcoma fina: 2-3
- Profundidad del punzón: 11 mm
- Pudrición fibrosa y hongo blanco

VC4.4

- Grado de ataque carcoma fina: 2-3
- Profundidad del punzón: 6 mm

VC4.5

- Grado de ataque carcoma fina: 2
- Grado de ataque carcoma gruesa: 3
- Profundidad del punzón: 26 mm

VC4.6

- Grado de ataque carcoma fina: 2-3
- Profundidad del punzón: 4 mm
- MAT zona sana

VC4.7

- Grado de ataque carcoma fina: 2-3
- Profundidad del punzón: 5 mm

VC4.8

- Grado de ataque carcoma fina: 1-2
- Pieza rota

pieza	Prof. Punzón	Observaciones
VC1,1	1	no se observa carcoma
VC1,2	4	ataque de carcoma generalizado
VC1,3		
VC1,4		
VC2,1	6	ataque generalizado de carcoma
VC2,2	4	Ataque general leve
VC2,3	12	Carcoma generalizada
VC2,4	9	Carcoma generalizada. Pudrición parte inferior hongos blancos
VC3,1	4	Carcoma generalizada. Fendas
VC3,2	8	Carcoma generalizada
VC3,3	20	Carcoma generalizada
VC3,4	7	Carcoma generalizada. Gema. Manchas de humedad
VC3,5	18	Ataque generalizado carcoma. Falta sección. Pudrición

VC3,6	20	Carcoma generalizada. Pudrición hongos blancos en los apoyos
VC4,1	4	Ataque generalizado de carcoma. Con fendas
VC4,2	6	Ataque generalizado de carcoma. Con fendas
VC4,3	11	Ataque generalizado de carcoma. Pudrición fibrosa y hongo blanco
VC4,4	6	Carcoma generalizada
VC4,5	26	Carcoma generalizada
VC4,6	4	Carcoma generalizada
VC4,7	5	Carcoma generalizada
VC4,8	6	Rotura total a 2,40m de la pared de la puerta. Agujero de 11 cm de profundidad y diam. De 2cmx1,5 cm a 2,92 m del muro de la puerta. Ataque generalizado de perforadores
VL1	10	Carcoma generalizada. Agujeros de carcoma gruesa
VL2	3	Carcoma generalizada. Agujeros de carcoma gruesa. Hongos
VL3	13	Carcoma generalizada y carcoma gruesa
VL4		
VL5		
VL6	6	Carcoma generalizada
VL7	5	Carcoma generalizada

VL8	8	Carcoma generalizada
VL9		
VL10	10	Ataque generalizado carcoma, con mayor intensidad en apoyo con VC1
VL11		
C1		
C2	20	Carcoma generalizada
C3	80	zona próxima a la chimenea muy afectada por pudrición

Anexo C. Información END

A continuación se muestra la leyenda y seguidamente la tabla con toda la información de los datos obtenidos en el estudio de las técnicas de ensayos no destructivos llevados a cabo en el Martinete de Navafría

	SIGNIFICADO	valor numérico	Significado
N	Numero de pieza		
Código	código de la pieza		
Tipo	tipo de pieza	1	viga principal
		2	Enano
		3	viga longitudinal
		4	Correa
		5	Lima
		6	Par
		7	Pilar
		8	Diagonal
Sp	especie de la madera	1	Pino silvestre
		2	Olmo
TS	tipo de sección	1	rectangular
		2	Circular
Estado		1	Infuncional
		2	A analizar
Ancho	ancho de la pieza		
Alto	Alto de la pieza		
Diam	Diámetro de la pieza de la pieza		

Largo	Longitud de la pieza		
H	humedad		
ProfPun	profundidad del punzón		
ProfPil1	profundidad de penetración del Pilodyn® en parte alta de la pieza		
ProfPil2	profundidad de penetración del Pilodyn® en parte media de la pieza		
ProfPil3	profundidad de penetración del Pilodyn® en parte baja de la pieza		
ProfPilSA	profundidad de penetración del Pilodyn® media considerando madera sana		
MAT_20	fuerza de extracción de arranque tornillo 20mm penetración		
MAT_30	fuerza de extracción de arranque tornillo 30mm penetración		
DenPIL	Densidad estimada mediante Pilodyn®		
DenMAT	Densidad estimada mediante MAT		
VelFAK	Medida de velocidad mediante Fakopp		
VelFAK12	Medida de velocidad mediante Fakopp corregida al 12% de humedad		
Tipo lectura FAK		1	cara-cara
		2	Testa-testa
MOEvelFAK	Módulo de elasticidad estático		
MORvelFAK			

N	Código	Tipo	Sp	TS	Estado	Ancho	Alto	Diam	Largo	H	Prof Pun	Prof Pil1	Prof Pil2	Prof Pil3	Prof PilSA	MAT_ 20	MAT_ 30	Den PIL	Den MAT	Vel FAK	Vel FAK12	Tipo lectura FAK	MOEvel FAK	MORvel FAK	Observaciones
1	C1	4	1	1	2	150	150		11,5																
2	C2	5	1	1	2	160	200		9,42		20														
3	C3	4	1	1	2	160	140		11,2	26,1	80	40	11	9	10			518	327						
4	C4	5	1	1	2	160	190					17	26	22											
5	C5,1	6	1	2	2			150	2,42			33	9	10	10			528							
6	C5,2	6	1	1	2	150	150		2,26			25	25	32											
7	C6	5	1	2	2			190	6,3			13	11	10	11			493							
8	C7	5	1	2	2			150	3,11			14	10	14	13			468							
9	PARES	6	1	2	2			12				11	8	40	10			528							
10	PARES	6	1	2	2			8				10			10			518							
11	VC0,3	2	1	1	2							11	14	13	13			468							
12	VC0,4	2	1	1	2								20	25											
13	VC1,1	2	1	2	2			134	0,67		1														
14	VC1,2	2	1	2	2			143	1,56	27,4	4		8	7	8			566							
15	VC1,4	1		1	2	240	240		8,47	23,4			16	10	13			461							Especie. Duda. Posibilidad de

																										que sea olmo.
16	VC2,1	2	1	2	2			135	0,73		6		18													
17	VC2,2	2	1	1	2	155	130		1,63		4			14	14			442								
18	VC2,3	2	1	1	2	130	90		0,67		12															
19	VC2,4	1		1	2	260	240		8,46		9		18													Especie. Duda. Posibilidad de que sea olmo.
20	VC3,1	2	1	1	2	160	130		0,74	24,5	4	11	11	10	11	0,95		506		4463	5020	1	10511	39,60		
21	VC3,2	2	1	1	2	185	110		1,58	23,4	8	17	15	12	15	0,82	1,28	430		3323	3702	1	4983	14,55		
22	VC3,3	2	1	1	2	160	130		1,57	23,4	20	18	22	14	14	0,69	1,65	442		4335	4830	1	9711	35,97		
23	VC3,4	2	1	1	1	105	190		1,5	20,3	7	11	14	12	12	1,69	3,51	474								bolsa de resina
24	VC3,5	2	1	1	2	140	100		0,67	26,6	18	24	21	16	16	0,29	0,51	404		3773	4324	1	7591	26,37		
25	VC3,6	1	1	1	2	270	300		8,59	25,3	20	10	10	12	11	0,47	1,85	506		4466	5060	1	10675	40,34		Hª centro de la pieza, plano horiz.
26	VC3,6	1	1		2					22,8										4398	4873	1	9892	36,79		Hª zona del muro, plano vert.
27	VC4,1	2	1	1	1	125	135		0,9	24,1	4	11	14	10	12	1,08		487		3478	3899	1	5811	18,30		
28	VC4,1	2	1		2					24,1										3295	3694	1	4951	14,40		
29	VC4,2	7	1	2	2			137	3,55		6	23	18	15	15			423								
30	VC4,3	4	1	2	2			115	2,12	25,9	11	16	8	14	13	0,27		468		4470	5092	2	10810	40,95		
31	VC4,4	2	1	2	2			124	0,79	23,9	6	30	19	11	11	0,46		499		3182	3561	1	4392	11,86		

Estudio sobre el estado de conservación de la cubierta del Martinete de Navafria.

32	VC4,5	2	1	2	2			135	0,79	26,0	26	18	19	20		0,11				3549	4046	1	6427	21,09	
33	VC4,6	2	1	1	2	130	130		0,65	25,6	4	12	11	7	10	0,48	2,2	518		3596	4085	1	6589	21,82	
34	VC4,6	2	1		2											1,00									
35	VC4,7	2	1	2	2			121	0,78	27,2	5	14	15	11	13	0,86		455		4051	4667	1	9030	32,88	
36	VC4,8	1	1	1	2	230	230		8,61	24,6	6	12	16	9	12	1,41		474							
37	VL1	2	1	2	2			165	1,32		10		18	17											
38	VL2	2	1	2	2			156	1,36		3		11	12	12			490							
39	VL3	8	1	2	2			150	2,18		13		15	14	15			433							
40	VL4 /VC1,2	2	1	2	2			143	1,56				8	7	8			566							
41	VL6	8	1	2	2			131	2,49		6	10			10			518							
42	VL7	2	1	2	2			99	1,6		5	10	10	10	10			518							
43	VL8	8	1	1	2	90	170		1,68		8	15	16	16	16			411							
44	VL10	3	1	1	2	170	100		6,29		10	14	12	14	13			455							
45	VL11	3	1	1	2	170	100		7,43	24,9		9	9	8	9	1,32	2,46	544		4892	5523	1	12618	49,15	incluye zona gotera
46	VL11	3	1		2					69,6							1,77								zona gotera

Anexo D. Planos

Anexo E. Fotografías

VL1



VL2



VL3







VL4



VL5



VL6





VL7



VL8





VC3



VC3-1



VC3-2



VC3-3



VC3-4





VC3-5





VC4-1



VC4-2



VC4-3





VC4-4



VC4-5





VC4-6



VL11



Anexo F. Propiedades de clase resistente de la madera aserrada

Esta tabla se ha obtenido del Documento básico de seguridad estructural Madera, del anexo E, tabla E1 donde se expresan las resistencias características en N/mm^2 , la rigidez en kN/mm^2 y la densidad en kg/m^3 .

Propiedades	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35
Flexión $f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35
Tracción paralela $f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21
Tracción perpendicular $f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Compresión paralela $f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	22	22	23	25
Compresión perpendicular $f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8
Cortante $f_{v,k}$	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,0	4,0	4,0
Rigidez, en kN/mm^2									
Mod. Elasticidad paralelo Medio $E_{0,medio}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13
Mod. Elasticidad paralelo 5º percentil $E_{0,k}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7
Mod. Elasticidad perpendicular medio $E_{90,medio}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,40	0,43	0,47
Mód. Transversal medio G_{medio}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81
Densidad en kg/m^3									
Densidad característica ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400
Densidad media ρ_{media}	350	370	380	390	410	420	450	460	480

Anexo G. Ensayos realizados en el eje del Martinete

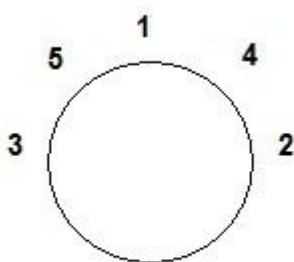
Aprovechando el hecho de que se disponía de equipos se realizaron ensayos en el eje del Martinete con el resistógrafo. En el presente anexo se recogen los resultados obtenidos.

Se realizaron diversas mediciones a lo largo del eje de la noria con el fin de evaluar posibles pudriciones internas.

Se realizaron diferentes mediciones que quedaron marcadas mediante una chincheta con el fin de que pueda ser identificada la sección a la que corresponde en el futuro.

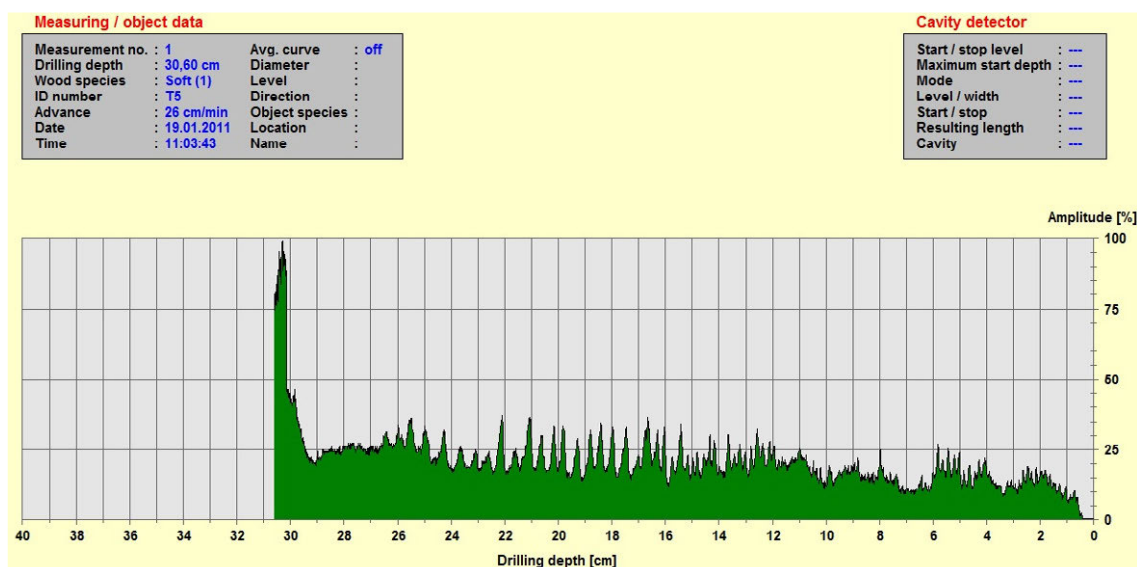
Con estos muestreos se han obtenido unos diagramas en los que aparece representada la resistencia que ofrece la madera a ser taladrada.

A continuación se exponen los histogramas obtenidos y se realiza alguna observación en aquellos más destacados. La disposición de los ensayos entorno a esta primera sección estudiada fue la que aparece en el esquema:



El primer ensayo se realizó a 57 cm del extremo interior del eje de la noria,

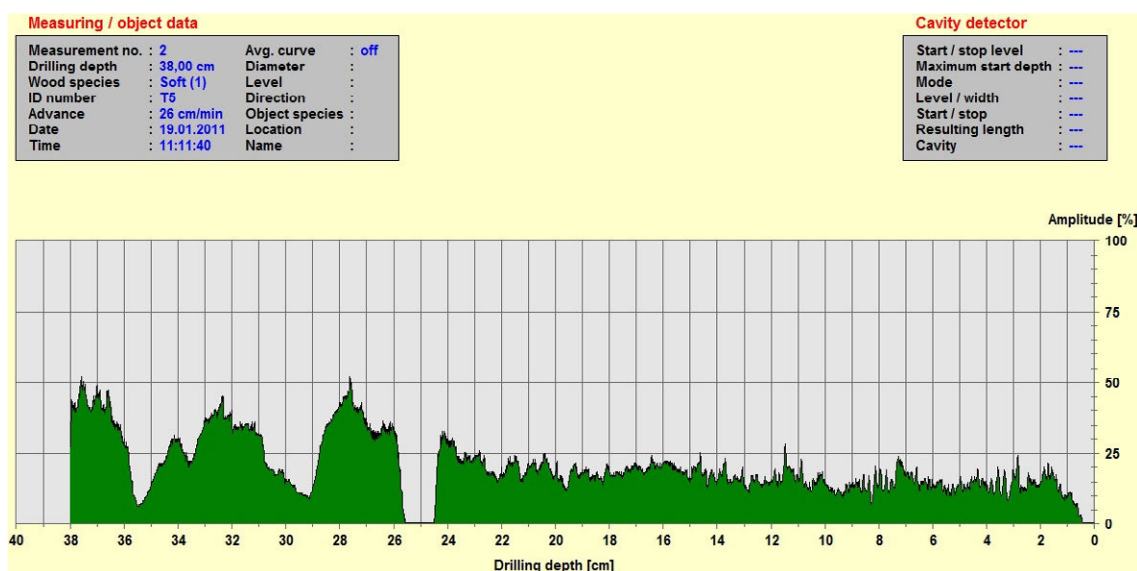
Este ensayo no presenta más singularidades que la ausencia de resistencia a la penetración en los primeros 5 mm y el aumento de la resistencia a partir de 30cm de profundidad, probablemente por la presencia de duramen.



Eje interior 1

La segunda lectura se realiza a 60 cm del extremo interior del eje del martinete, en la cara del octógono perpendicular según el sentido de las agujas del reloj a donde se ha realizado el primer ensayo.

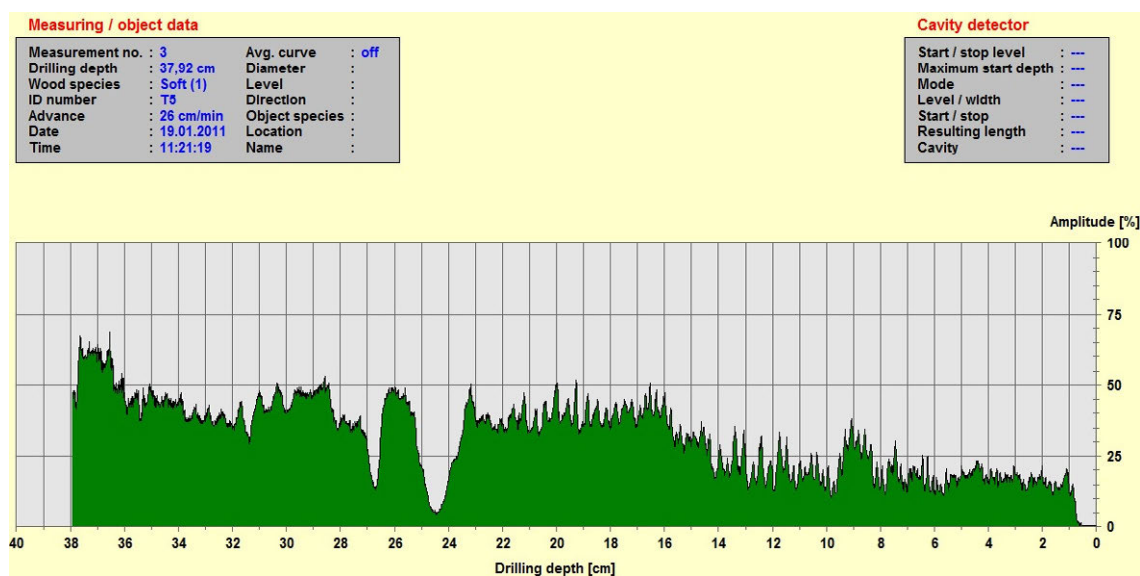
En esta medida no aparece resistencia a la penetración en los 5 mm iniciales y a 24,5cm de profundidad aparece una discontinuidad que hace notar la presencia de un hueco de 1,2 cm de espesor.



Eje interior 2

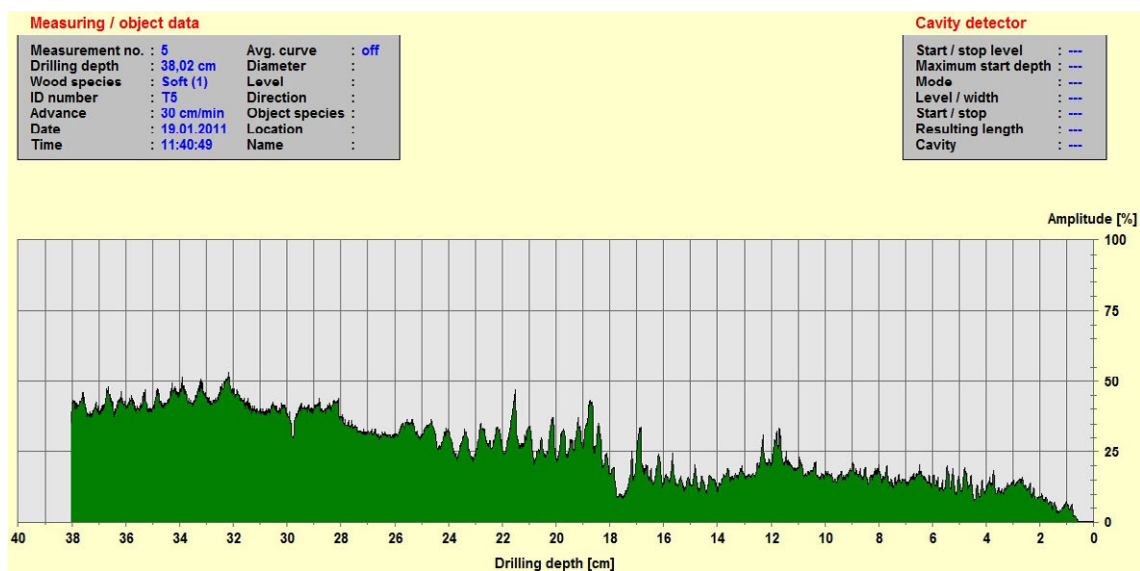
La lectura 3 se realizó opuesta a la lectura 2 y a 55 cm del extremo del eje. Presenta una ausencia de resistencia a la penetración en los 7 primeros mm y a partir de 14,5 cm se produce un aumento de la reistencia a la penetración, posiblemente por la aparición de

duramen. Entorno a los 24,5 y 27,0 cm se produce una importante disminución de densidad.



Eje interior 3

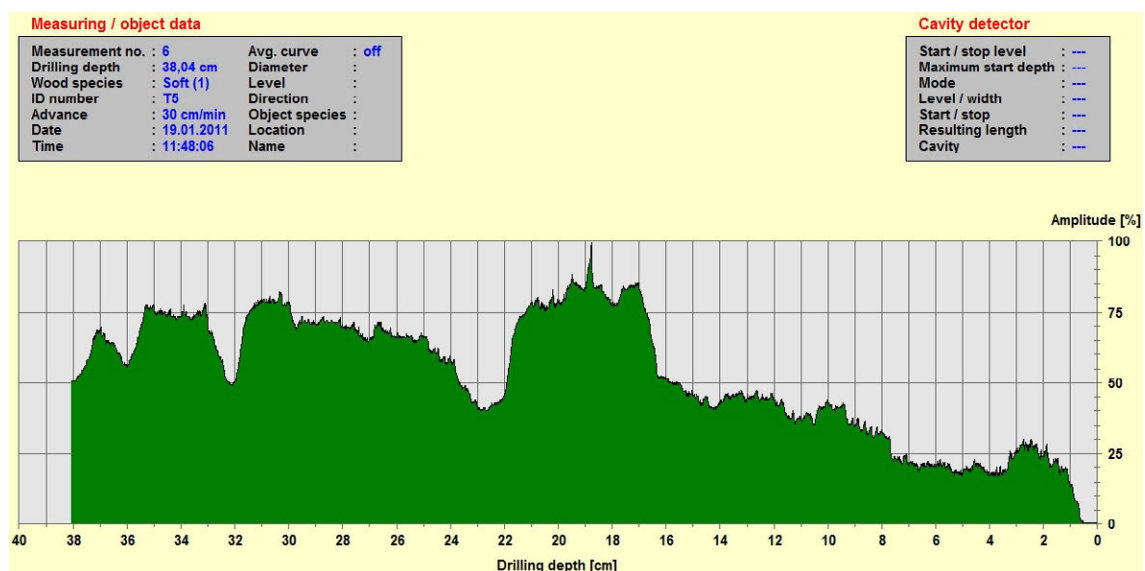
En la cuarta lectura la disminución la densidad inicial abarca los 6 primeros mm apareciendo un ligero aumento de la resistencia ofrecida a la penetración, y por consiguiente un aumento de la densidad, debido seguramente a la aparición a esa profundidad de duramen. Esta medición está situada a 28 cm del inicio del eje.



Eje interior 4.

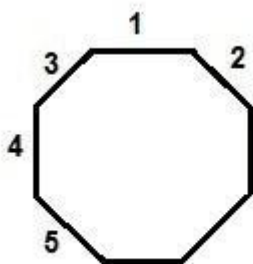
En el ensayo 5 los 7 primeros mm no ofrecen resistencia a la penetración, y a partir de los 8 cm se produce un aumento de la resistencia que se acentúa a los 17 cm de profundidad

por la seguramente por la presencia de duramen. Esta medición se realizó a 30 cm del extremo del eje, entre los ensayos 1 y 3.

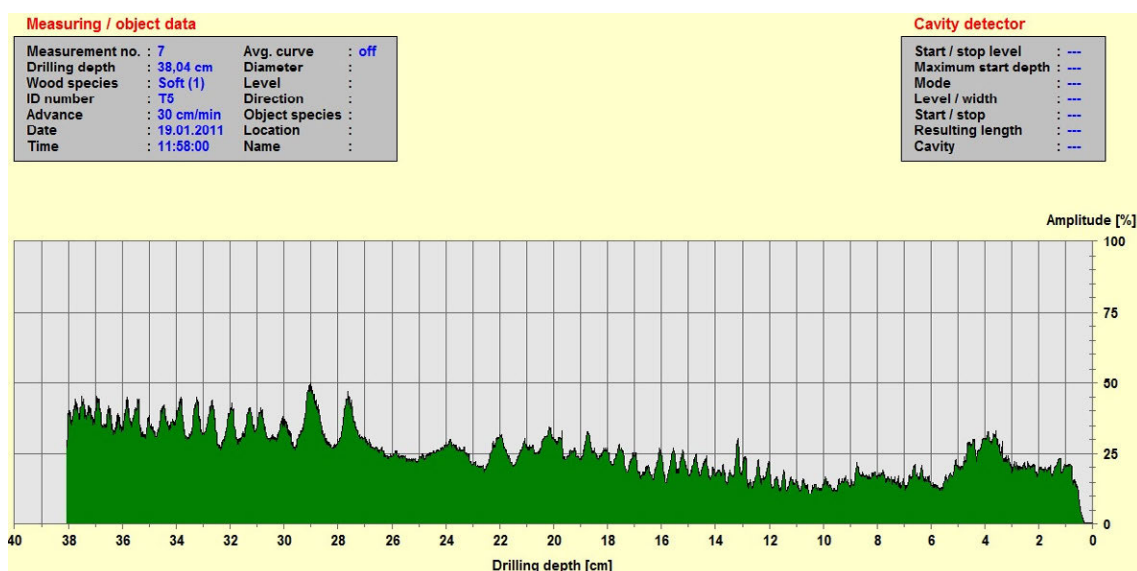


Eje interior 5

En el interior del Martinete se realizaron medidas también en una zona media del eje, donde se realizaron otras 5 medidas. Estas medidas se realizaron donde el eje está tallado en un octógono siendo el taladro en una de las caras que posteriormente se mantiene al pasar a tener una sección de 16 lados. La primera medida, que se emplea como referencia se realiza en la cara que presenta un nudo a 2,6 m, por si fuera necesario para la ubicación del ensayo.

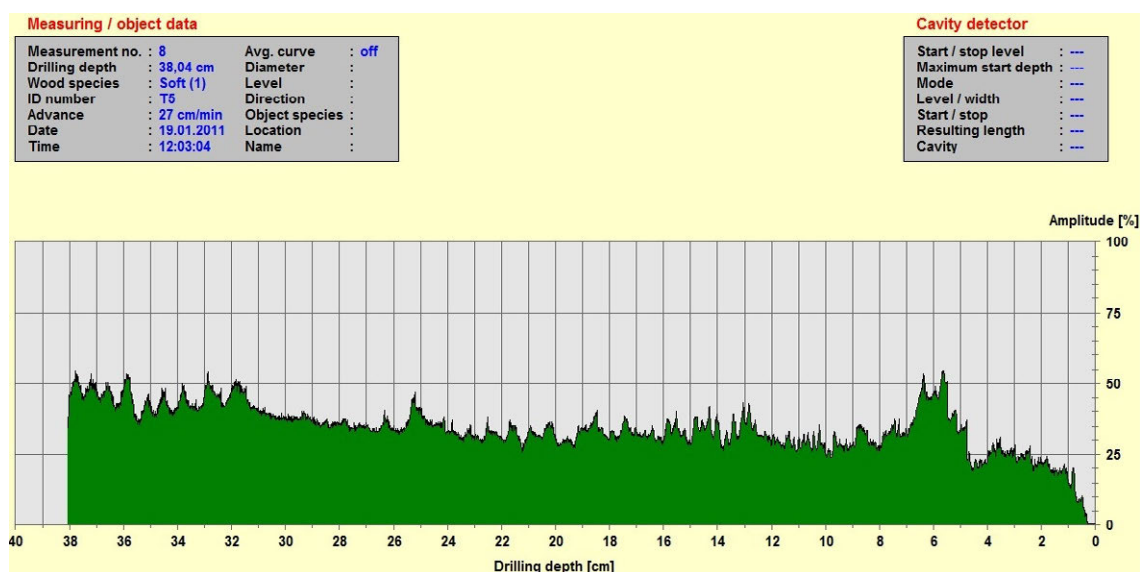


En la lectura 1 situada a 2,24 m del extremo interior del eje. No hay resistencia en los 4 mm primeros.



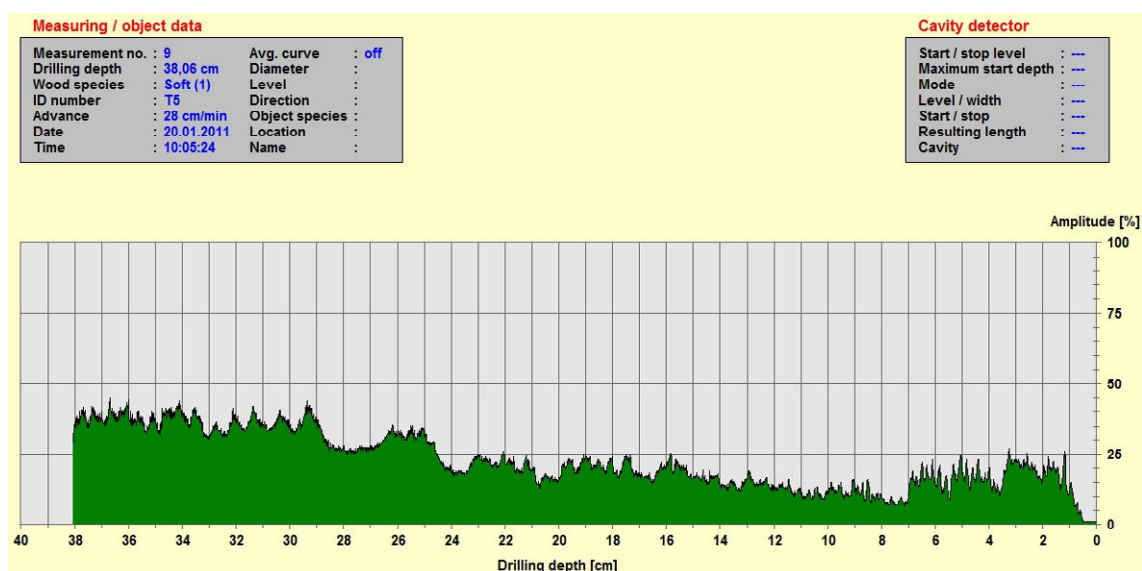
Eje interior medio1.

La segunda medición se realiza según el esquema inicial y a una distancia de 2,24 m del extremo interior del eje. Presenta una resistencia a lo largo de toda la sección algo mayor que en los otros ensayos.



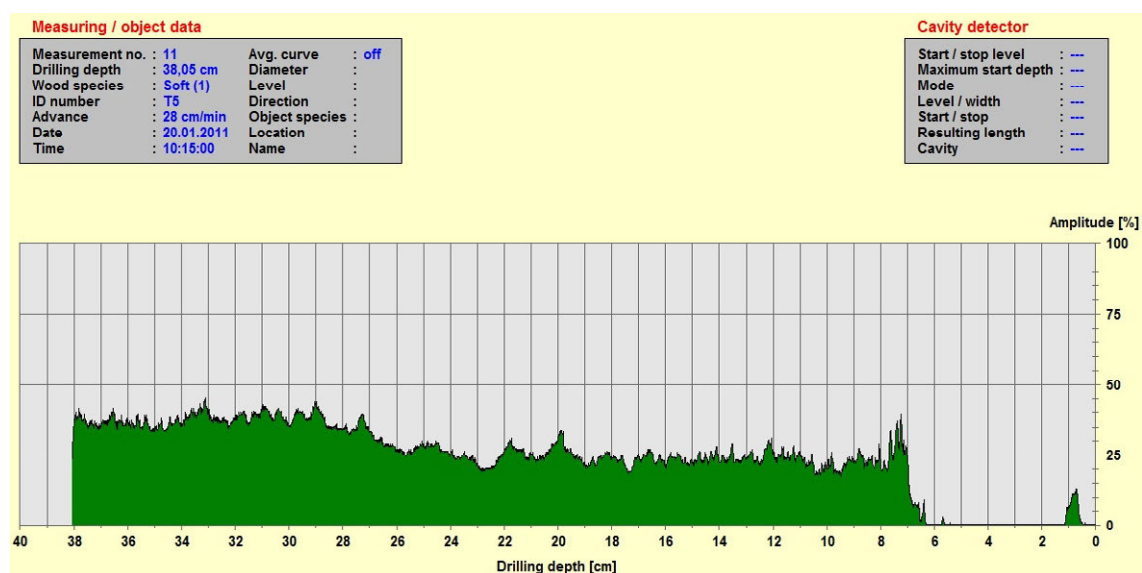
Eje interior medio2.

La medición 3 se realizó a una distancia del extremo del eje de 2,70 m. En esta lectura se percibe un pequeño chasquido cuando se alcanzaba una profundidad de 7 y se reduce la resistencia a la penetración, luego se va recuperando poco a poco y a partir de los 24 cm la resistencia es mayor posiblemente por la presencia de duramen.



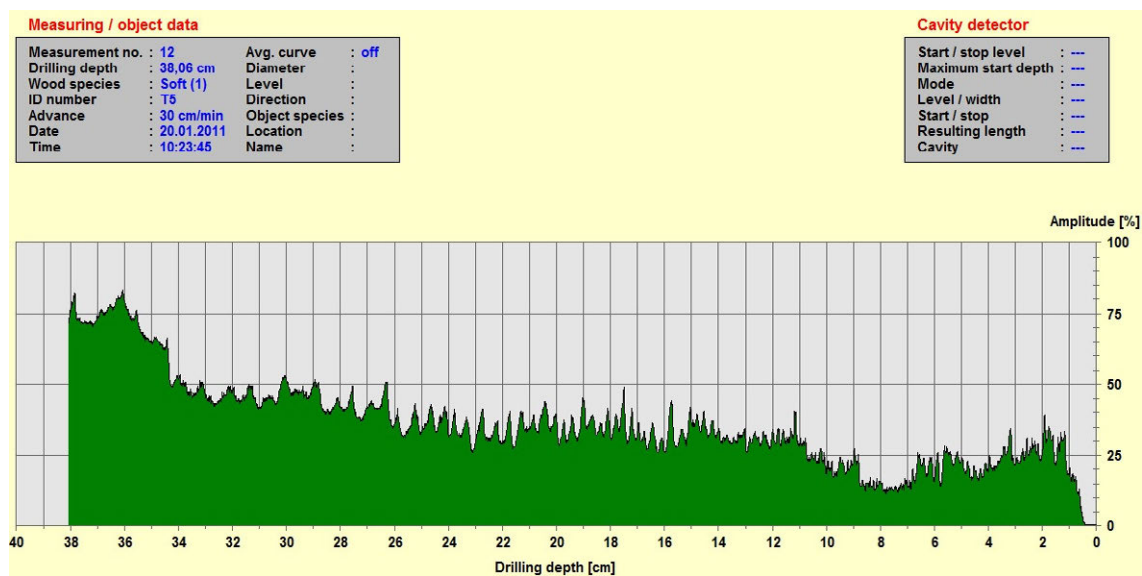
Eje interior medio 3.

En la medida nº 4 realizada a 2,40 m del extremo interior del eje encontramos una discontinuidad en el material de 5,5 cm de espesor situada a 1,2 cm de profundidad. No ofrece resistencia a la penetración además en los 5 mm iniciales.



Eje interior medio 4.

No presenta resistencia a la penetración en los primeros 5 mm. Este quinto ensayo se realizó a una distancia del extremo interior del eje de 2,4 m.



Eje interior medio 5.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, L. Basterra, A. Casado Sanz M. y Acuña Rello L. (2005) Aplicación del resistógrafo al diagnóstico de elementos singulares en estructura de madera. I jornadas de investigación en construcción. ICC “Eduardo Torroja”.
- Arriaga F., Peraza F., Esteba M., Bobadilla I., García F. (2002). Intervención en estructuras de madera. AITIM.
- BOCYL-D-18061998-21.
- BOE núm. 161. Martes 7 julio 1998.
- Casado, Rosario; Carrascosa, José María. (1977). La calderería de cobre y el Martinete de los Abán de Navafría. Estudios de artes y costumbres populares.
- Catálogos comerciales Onduline®.
- Catálogos comerciales Rockwool®.
- Catálogos comerciales Tyvek®.
- Cruz, Óscar; Soler, Jorge et al. (1986). El Martinete de la fundición de cobre de Navafría: Una supervivencia tecnológico-medieval en tierras segovianas. Museo Nacional de la Ciencia y la Tecnología y Junta de Castilla y León.
- Documento Básico Seguridad en caso de Incendio. (2010).
- Documento Básico Seguridad Estructural-Acciones en la Edificación. (2009).
- Documento Básico Seguridad Estructural-Madera. (2009).
- Esteban Herrero, M. (2003). Determinación de la capacidad resistente de la madera estructural de gran escuadría y su aplicación en estructuras existentes de madera de conífera. Tesis Doctoral. ETSI de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
- Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Parte 1-2 Reglas suplementarias para el cálculo de estructuras sometidas al fuego.
- Eurocódigo 5. Proyecto de estructuras de madera. Reglas generales y reglas para edificación.
- Francisco Arriaga Martitegui y Miguel Esteban Herrero. (2001). Protección de la madera mediante el diseño constructivo. Boletín de información técnica nº 214. AITIM.
- Hermoso Prieto, Eva. Ingenios de madera. (1999). Boletín de información Técnica nº 197. AITIM.
- Ibáñez García, Miguel. (2006). PFC Análisis estructural de las Casas Colgadas de Cuenca: casa del canónigo Gonzalo González de Cañamares.

- Íñiguez, G. (2007). Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de la madera aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural. Tesis Doctoral. ETSI de Montes. Universidad Politécnica de Madrid.
- Manual de uso Metalpla-2D-2010.
- Manual de uso Metalpla-3D-2010.
- Manual Issued 03-99. IML-RESI F-Series. Bluetooth Electronic. F-Tools.F-Tools Pro.
- Morís Menéndez-Valdés, Gonzalo. (1995). Ingenios hidráulicos históricos molinos, batanes y ferrerías. Ingeniería del Agua. Vol. 2 Núm. 4 (diciembre 1995).
- Peraza F. et al. (2004). Especies de maderas para construcción, carpintería y mobiliario. AITIM.
- Peraza Sánchez, Fernando. (2002). Protección preventiva de la madera. AITIM.
- Sanz, Ignacio. (2000). El Martinete de Navafría. Segovia Sur.
- Soler Valencia, Jorge Miguel (2006) «El Martinete de la fundición de cobre de Navafría.» El Adelantado de Indiana nº 4.
- UNE 56.544 Clasificación visual de la madera aserrada para uso estructural.

- www.cetemas.es
- www.dataholz.es
- www.onduline.com
- <http://patrimonioindustrialensegovia.blogspot.com/>.
- <http://www.dagasl.es>
- <http://www.tecmasa.com/>

Software especializado empleado:

